

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Toni Kokan**

**Split, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Toni Kokan**

**Mehanička svojstva naglo hlađenog samozbijajućeg  
betona nakon izlaganja visokim temperaturama**

**Diplomski rad**

**Split, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Toni Kokan

BROJ INDEKSA: 569

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Mehanička svojstva naglo hlađenog samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti djelovanje visokih temperatura na mehanička svojstva betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati utjecaj naglog hlađenja uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama. Uzorke je potrebno ispitati nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, te naglo hladiti vodom. Na uzorcima se mjeri veličina sile, tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Rezultate je potrebno prikazati, usporediti sa prethodnim ispitivanjima te komentirati.

U Splitu, 17. ožujka, 2017.

Voditelj diplomskog rada:

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Sandra Juradin

Doc. dr. sc. Veljko Srzić

## **ZAHVALA**

---

*Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici prof. dr. sc. **Sandri Juradin** na pomoći, strpljenju, vodstvu i izuzetnom trudu i suradnji tijekom izrade rada te svima koji su svojim savjetima pridonijeli kvaliteti ovog rada.*

*Najveće hvala mojoj obitelji i svim mojim najbližima koji su vjerovali u mene i davali mi bezuvjetnu podršku, ljubav i razumijevanje tijekom svih godina studiranja.*

# **Mehanička svojstva naglo hlađenog samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama**

## ***Sažetak:***

Beton je građevinski materijal otporan na požar, a promjene koje se događaju na betonskim uzorcima pri naglom hlađenju nakon izlaganja visokim temperaturama ovise o sastavu betona te o razini temperature. U radu je ispitan utjecaj naglog hlađenja uzoraka betona nakon izlaganja visokim temperaturama. Uzorci betona cilindričnog oblika ispitani su nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C. Nakon izlaganja visokim temperaturama te naglog hlađenja vodom na uzorcima je određena veličina sile, tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Analiza rezultata ispitivanja dana je u radu.

## ***Ključne riječi:***

Samozbijajući lagani beton, visoke temperature, naglo hlađenje vodom, tlačna čvrstoća, rezidualna svojstva

# **Mechanical properties of sudden cooling self-compacting concrete after exposure to high temperatures**

## ***Abstract:***

Even do, concrete is a fire-resistant building material, changes occurring on the concrete samples that are extremely cooled after being exposed to high temperatures depend on the composition of concrete and the temperature level. This paper investigated the effect of sudden cooling of concrete samples after exposure to high temperatures. Cylindrical form concrete samples were tested after drying at 100°C and heating at 300°C, 500°C and 700°C. After exposing samples to high temperatures and then sudden cooling with water we determined force, compressive strength, ultrasonic passage velocity, dynamic modulus of elasticity as well as mass change. Analysis of the test results was given in the work.

## ***Keywords:***

Self compacting lightweight concrete, high temperature, sudden cooling with water, compressive strength, residual properties

## SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	Općenito o betonu.....	1
1.1.1	Građevinski otpad kao novi materijal .....	1
<b>2</b>	<b>SAMOBIBIJAJUĆI LAKI BETON.....</b>	<b>5</b>
2.1	Općenito o samobijajućem betonu.....	5
2.1.1	Povijesni razvoj samobijajućeg betona.....	5
2.1.2	Svojstva samobijajućeg betona.....	7
2.1.3	Primjeri primjene samobijajućeg betona .....	8
2.2	Općenito o lakom betonu.....	9
2.2.1	Podjela lakih betona .....	9
2.2.1.1	Laki betoni od jednakoiznatog agregata .....	9
2.2.1.2	Ćelijasti betoni .....	10
2.2.1.3	Lakoagregatni betoni .....	10
2.2.2	Svojstva lakih betona .....	11
2.2.2.1	Liapor lagani betoni .....	11
2.3	Trajnost betona s agregatom od recikliranih materijala .....	12
2.3.1	Otpornost na požar .....	13
<b>3</b>	<b>POŽARNA OTPORNOST .....</b>	<b>14</b>
3.1	Djelovanje požara na beton .....	15
3.2	Djelovanje požara na konstrukcije .....	19
<b>4</b>	<b>DOSADAŠNJA ISPITIVANJA BETONA NA POŽAR.....</b>	<b>22</b>
4.1	Samobijajući lagani beton na visokim temperaturama (Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kollandasamy) .....	22
4.1.1	Uvod.....	22

4.1.2	Materijali i metode .....	23
4.1.2.1	Materijali .....	23
4.1.2.2	Sastav mješavine .....	25
4.1.2.2	Ispitivanje.....	26
4.1.3	Rezultati i analiza .....	27
4.1.3.1	Utjecaj agregata od kokosovih ljuski na svojstva svježeg betona .....	27
4.1.3.2	Utjecaj kokosovih ljuski na gustoću betona.....	29
4.1.3.3	Utjecaj visoke temperature na gubitak mase .....	29
4.1.3.4	Utjecaj visoke temperature na tlačnu čvrstoću betona.....	31
4.1.3.5	Statističko modeliranje.....	33
4.1.4	Zaključak .....	35
4.2	Rezidualna mehanička svojstva betona od vapnenca i granita nakon djelovanja požara (Cristina Calmeiro dos Santos, Joao Paulo Correia Rodrigues).....	36
4.2.1	Uvod.....	36
4.2.2	Materijali i metode .....	38
4.2.2.1	Sastav betona .....	39
4.2.2.2	Uzorci.....	39
4.2.2.3	Plan ispitivanja.....	40
4.2.3	Ispitivanja tlačne čvrstoće .....	41
4.2.4	Ispitivanja vlačne čvrstoće .....	42
4.2.5	Ispitivanja rezidualne čvrstoće na savijanje .....	43
4.2.6	Ispitivanja rezidualnog modula elastičnosti .....	43
4.2.7	Rezultati .....	44
4.2.7.1	Rezidualna tlačna čvrstoća.....	44
4.2.7.2	Rezidualna vlačna čvrstoća .....	47
4.2.7.2.1	Izravna metoda .....	47



4.2.7.2.2	Metoda cijepanja.....	48
4.2.7.2.3	Rezidualna čvrstoća na savijanje.....	50
4.2.7.3	Rezidualni modul elastičnosti.....	51
4.2.8	Zaključak.....	52
4.3	Utjecaj visoke temperature i vremena zagrijavanja na rezidualnu čvrstoću normalnog betona i betona visoke čvrstoće ( B.Toumi, M.Resheidat, Z.Guemmedi, H. Chabil).....	53
4.3.1	Uvod.....	53
4.3.2	Eksperimentalna studija .....	55
4.3.2.1	Materijali.....	55
4.3.2.2	Sastav mješavine.....	56
4.3.2.3	Postupak miješanja.....	57
4.3.2.4	Metodologija ispitivanja .....	57
4.3.2.5	Komentar rezultata.....	58
4.3.2.6	Utjecaj temperature i vremena grijanja.....	59
4.3.2.7	Učinci na čvrstoću.....	61
4.3.2.8	Utjecaj vlakana od polipropilena .....	62
4.3.2.9	Vlačna čvrstoća na savijanje.....	64
4.3.3	Zaključak.....	64
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA .....</b>	<b>65</b>
5.1	Uvod u eksperimentalni dio rada.....	65
5.2	Upotrebljeni materijali.....	66
5.2.1	Sastavi betonskih mješavina.....	66
5.3	Rezultati ispitivanja provedenih u svježem stanju .....	67
5.3.1	Rezultati rasprostiranja slijeganjem .....	67
5.3.2	Rezultati ispitivanja V-lijevkom .....	67
5.3.3	Rezultati ispitivanja L-posudom i J-prstenom .....	68

5.3.4	Sadržaj pora betonskih mješavina .....	68
<b>6</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NA POŽAR .....</b>	<b>69</b>
6.1	Postupak ispitivanja.....	69
6.2	Rezultati i analiza ispitivanja naglo hlađenih uzoraka .....	72
6.2.1	Tlačna čvrstoća.....	72
6.2.2	Dinamički modul elastičnosti.....	81
6.2.3	Promjena mase uzoraka.....	89
6.2.4	Promjena temperature .....	92
6.2.5	Struktura betona .....	93
6.2.6	Analiza dobivenih rezultata.....	94
6.3	Usporedba dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim u diplomskom radu [5] u kojem su uzorci hlađeni na zraku .....	98
6.3.1	Usporedba tlačne čvrstoće.....	98
6.3.2	Usporedba dinamičkog modula elastičnosti.....	102
6.3.3	Usporedba promjene masa uzoraka.....	103
6.3.4	Analiza rezultata.....	105
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA:.....</b>	<b>110</b>

# 1 UVOD

## 1.1 Općenito o betonu

Beton je građevinski materijal izrađen od veziva, vode i agregata (prirodni, umjetni i reciklirani). Također, uz ove obavezne komponente u beton se mogu dodati i razni dodatci (aditivi) koji mu daju posebna svojstva (akceleratori, aeranti, plastifikatori, dodaci protiv smrzavanja, itd.). Beton se kao materijal za građenje pojavljuje 300. godina prije nove ere. Iako postoje i raniji dokazi (3000 godina prije nove ere Egipćani su koristili blato pomiješano sa slamom kako bi povezali osušene cigle, Kinezi su pri izgradnji Kineskog zida koristili prirodni cementni materijal, 800 godina prije nove ere Babilonci su se koristili bitumenom kako bi povezali cigle i kamenje), prvi su Rimljani poznavali i koristili beton sličan današnjem (koristili su pucolanski cement iz Pozzuolija, pokraj Vezuva, a postoje i zapisi Plinija i Vitruvija o omjerima mješavine žbuke). Padom Rimskog Carstva proizvodnja betona je zaboravljena sve do 14. stoljeća kada je počela ponovna upotreba živog vapna i pucolana. Prava prekretnica u korištenju betona je spoznaja da se beton može armirati čeličnim šipkama (Francuska, Joseph Monier, 19. stoljeće). Takva spoznaja dovela je do revolucije u graditeljstvu. [1]

### 1.1.1 Građevinski otpad kao novi materijal

Sve je aktualnije iskorištavanje recikliranog agregata, odnosno agregata dobivenog ispiranjem otpadnog svježeg betona ili drobljenjem otpadnog očvrslulog betona i ostalih građevinskih materijala koji se inače nebi iskoristili, već bi završili na deponiju.

Okvirna direktiva o otpadu (Waste Framework Directive – WFD) zahtijeva od zemalja članica EU da se do 2020. godine za ponovno korištenje, recikliranje i druge vrste uporabe materijala koristi najmanje 70 % mase ukupnog neopasnog građevinskog otpada koji se generira. [2]

Poznato je da su se razvijene zemlje krajem dvadesetog stoljeća susrele s velikim ekološkim problemom – građevinskim otpadom, a kao rješenje prihvaćen je postupak recikliranja građevinskog otpada čime će rješavati pitanje velikih količina otpada na odlagalištima, ali i pitanje prevelike eksploatacije prirodnih resursa. [2]

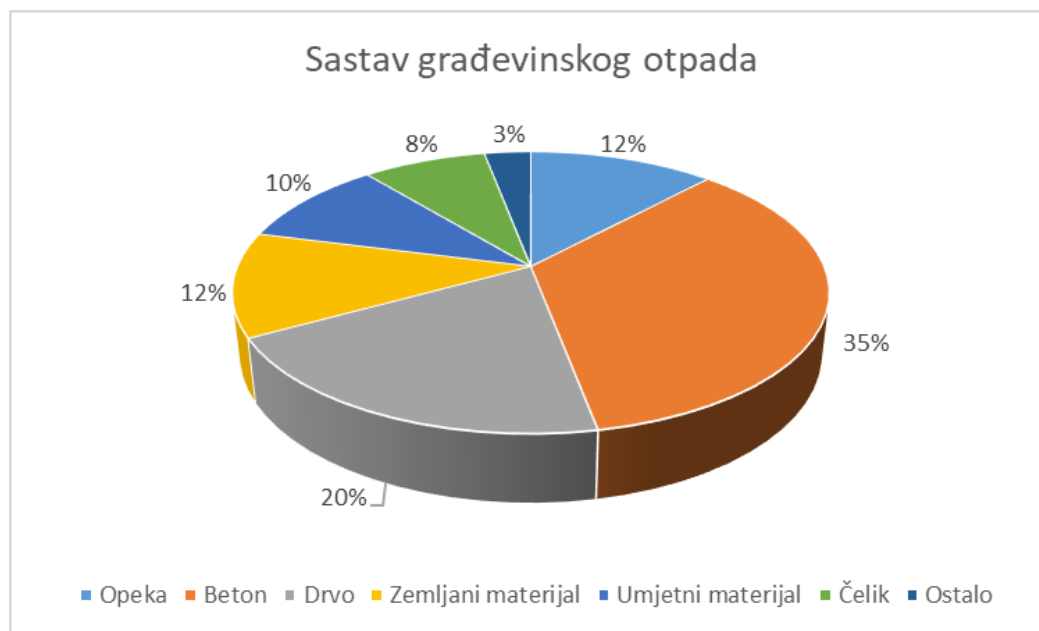
Budući da je svjetski trend upotreba recikliranih materijala u svim područjima ljudske djelatnosti pa tako i u građevinarstvu, potrebno je i u građevinskoj praksi na području Hrvatske implementirati reciklirani građevinski otpad u proizvodni proces.

U okviru projekta LIFE05 TCY/CRO/000114 CONWAS (*Development of sustainable construction and demolition waste management system for Croatia, 2006-2008*) na Građevinskom fakultetu u Zagrebu procijenjeno je da Republika Hrvatska proizvodi 2,5 mil. tona godišnje građevinskog otpada. Trenutni stupanj reciklaže građevnog otpada ne prelazi 7 %, a iz građevinskog otpada izdvoji se oko 11 % sekundarnih sirovina. [2]

*Tablica 1.1. Količina recikliranih građevinskih materijala u Hrvatskoj i zemljama u okruženju [2]*

Zemlja	Količina građevinskog otpada (milijun tona)	Količina koja se oporabljuje (%)
Bugarska	7.80	N/A
Mađarska	10.12	16
Rumunjska	21.71	N/A
Slovenija	2.00	53
<b>Hrvatska</b>	2.34	7
Srbija	1.00	0

Uzevši u obzir geografske specifičnosti Hrvatske, u Dalmaciji i Primorju kao građevinski otpad prevladava kamen, u sjeverozapadnom dijelu beton i opeka, a u istočnom opeka odnosno miješani otpad. Procijenjene su količine građevinskog otpada na temelju podataka prikupljenih u okviru projekta CONWAS, podataka Agencije za zaštitu okoliša, regionalnih karakteristika i podataka Državnog zavoda za statistiku (DZS) oko 2 345 273 tone na godinu. Građevinski otpad sastavni je dio građenja, neovisno radi li se o izgradnji novog ili izvedbi rekonstrukcije već postojećeg objekta. Na slici 1.1. prikazan je sastav građevinskog otpada nastalog pri rušenju stambenih građevina [3]. Vidljivo je da više od trećine od ukupnog sastava građevinskog otpada čini beton, a najmanji postotak pripada umjetnim materijalima.



*Slika 1.1. Sastav građevinskog otpada, [3]*

U nacionalnom interesu trebalo bi biti da građevinski materijal ne završi na divljim deponijima, nego da se kontrolirano odlaže i u potpunosti reciklira kako bi se ponovno iskoristio za građevinske namjene. Građevinarstvo predstavlja jedan od glavnih pokazatelja razvitka i prosperiteta u zapadnim zemljama, a građevinski otpad i otpad od rušenja su prepoznati kao prioritetan problem za rješavanje u Europskoj uniji. To znači da će se posebna pažnja posvetiti mjerama promicanja reciklaže takve vrste otpada. Zahvaljujući činjenici da građevinski otpad i otpad od rušenja zauzimaju veliki volumen, povećanjem postotka reciklaže moći će se iskoristiti dragocjeni prostor koji su zauzimala odlagališta. Nadalje, ako se takav otpad ne razvrsta na samom izvoru, može sadržavati male količine opasnog otpada. [2]

Vrsta materijala	Porijeklo	Primjena
Čisti lom opeke	Proizvodnja opeke	Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona, stabiliziranje, drenažni slojevi, ispuna, nasipavanje.
Miješani lom od rušenja u visokogradnji s lomom opeke (šuta miješana s opekam)	Stambena gradnja, visokogradnja	Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona, stabiliziranje, ispuna, nasipavanje, završni slojevi podova
Miješani lom od rušenja u visokogradnji s lomom opeke (šuta miješana s opekam)	Industrogradnja, visokogradnja	Stabiliziranje nasipa, izgradnja sportskih terena
Mineralni otpad	Industrogradnja, visokogradnja	Nasipavanje, izgradnja sportskih terena drenaža
Reciklirani pijesak	Industrogradnja, visokogradnja	Podloga za postavljanje cijevi pri uvođenju infrastrukture (plin, voda, itd.)
Reciklirani pijesak	Cestogradnja	Nevezani gornji nosivi slojevi, nevezani donji nosivi slojevi, vezani nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova, dodatni materijali za proizvodnju asfalta
Betonski lom	Cestogradnja, izgradnja mostova, industrogradnja	Nevezani gornji nosivi slojevi, nevezani donji nosivi slojevi, cementom vezani nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova, dodatni materijali za proizvodnju betona, drenažni slojevi
Miješani asfaltni/betonski	Cestogradnja, parkirališta izgradnja mostova	Nevezani gornji nosivi slojevi, nevezani donji nosivi slojevi, vezani nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova

*Slika 1.2. Mogućnosti uporabe otpadnih materijala (CONWAS, 2008) [2]*

## 2 SAMOZBIJAJUĆI LAKI BETON

### 2.1 Općenito o samozbijajućem betonu

Samozbijajući beton (Self-Compacting Concrete - SCC), po mnogim autorima, je najrevolucionarnije otkriće industrije 20. stoljeća budući da ne zahtjeva upotrebu vibracijskih uređaja prilikom ugrađivanja i zbijanja. Zahvaljujući svojim svojstvima značajno je pridonio povećanju kvalitete betonskih konstrukcija, a ujedno je omogućio primjenu betona u području građevinarstva za koje su se do tada koristili drugi materijali.

Samozbijajući beton teče pod utjecajem vlastite težine, bez segregacije tijekom čega se daerira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti ispunjava sve dijelove oplata zaobilazeći armaturu. To je građevinski materijal koji se sastoji od cementa, agregata, vode i aditiva kao i obični beton uz dodatak pucolanskih materijala, letećeg pepela, mikrosilike, koloidnih silikata, metakaolina te kemijskih dodataka. Samozbijajući beton ima manji udio zraka i krupnog agregata u usporedbi s običnim betonom, dok je udio sitnog agregata jednak.

Prednosti su brža gradnja, smanjenje broja potrebnih radnika, lakše ugrađivanje, poboljšana trajnost, veća sloboda oblikovanja elemenata, smanjenje buke te ugrađivanje bez vibracija.

Glavni nedostaci upotrebe samozbijajućeg betona su veća cijena materijala, stroži zahtjevi za kvalitetu i veći pritisak na oplatu u odnosu na obični beton [4].

#### 2.1.1 Povijesni razvoj samozbijajućeg betona

Počeci razvoja samozbijajućeg betona zabilježeni su u Japanu 1983. godine kao posljedica ubrzanog propadanja armiranobetonskih konstrukcija te nedostatka kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona. Problem trajnosti konstrukcija bio je usko povezan sa korozijom armature u betonu, što je rezultat loše ugradnje betona kao i loše projektiranog sastava betona. Kod betona takvog sastava, ukoliko se prilikom ugradnje adekvatno ne vibrira, dolazi do pojave segregacije te je omogućen prolazak vodi do armature.

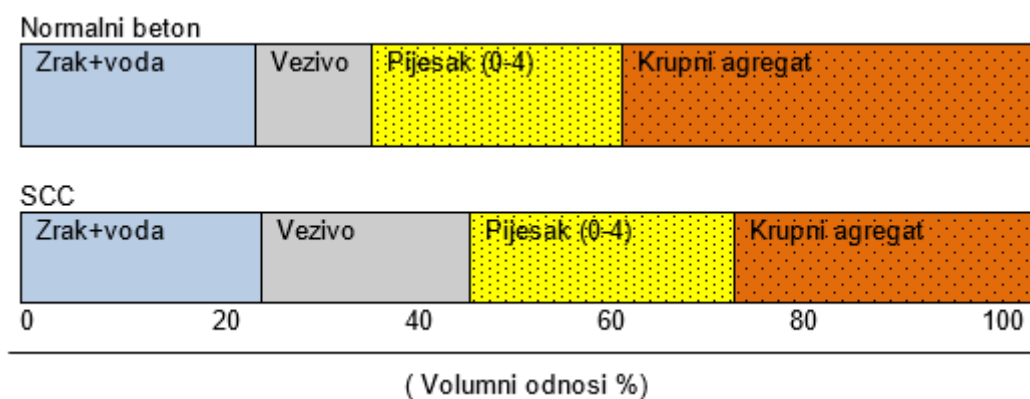
Rješenje je ponudio profesor Okamura sa Sveučilišta u Tokiju 1988. godine. Izradio je prvi prototip samozbijajućeg betona koristeći materijale koji su već bili dostupni na tržištu. Svojstva tog betona mogu se promatrati u tri stanja:

- u svježem stanju: svojstvo samozbijanja,
- u ranoj starosti: izbjegavanje inicijalnih defekata,
- u očvrslom stanju: otporan na vanjske utjecaje [4]

Metoda je ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata ( $C_2S$ ). Osnovni principi projektiranja sastava prema ovoj metodi su sljedeći:

- Volumen krupnog agregata u betonu je 50 %
- Sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom (skupa sa cementom, te aktivnim i inertnim dodacima)
- Vodovezivni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta pomoću V-lijevka
- Preporučuje se vrijednost rasprostiranja slijeganjem 650 mm te se prema tome prilagođava udio superplastifikatora

Na temelju ove metode nastale su mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala. [5]



Slika 2.1. Volumni odnosi (%) normalnog betona i SCC [6]



### 2.1.2 Svojstva samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton mora zadovoljavati zahtjeve dane Europskim smjernicama poput:

- Razreda tlačne čvrstoće
- Maksimalne veličine zrna agregata  $D_{\max}$
- Razreda izloženosti ili granične vrijednosti sastava:
  - Maksimalni vodocementni faktor
  - Minimalna količina cementa
- Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton
  - Vrijednost  $T_{500}$  (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
  - Ispitivanje L kutijom
  - Otpornost segregaciji
  - Temperatura svježeg betona
  - Drugi tehnički zahtjevi

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- TEČENJE- rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja

Procjenjuje se metodom rasprostiranja slijeganjem (Slump flow).

- VISKOZNOST- otpor materijala tečenju

Procjenjuje se mjerenjem u reometru, empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode (određivanje parametra  $T_{500}$ , O-lijevka, Orimet).

- SPOSOBNOST ZA OBILAŽENJA PREPREKA- sposobnost svježeg samozbijajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu te popunjava oplatu, a da pritom ne dođe do segregacije.
- OTPORNOST SEGREGACIJI- izražava se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.

Osnovne karakteristike sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućim betonom su tečenje i viskoznost kojoj uvelike pridonosi udio superplastifikatora u mješavini. [7]

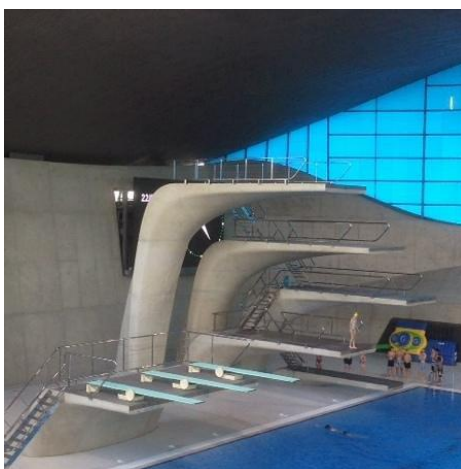
### 2.1.3 Primjeri primjene samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton prvi put se upotrijebio na zgradi u lipnju 1990. Nakon toga SCC je korišten u konstrukciji tornjeva prednapetog betonskog mosta Shin-kiba Ohashi u Japanu 1991.



*Slika 2.2. Most Akashi Kaikyo; Shin-kiba Ohashi most, Japan, 1991. godina [8]*

Zanimljiv je primjer upotrebe samozbijajućeg betona kod izgradnje skakaonica u Aquatics Centre London.



*Slika 2.3. Skakonice, Aquatics Centre, London 2012. godina [9]*

Samozbijajući beton ostvario je napredak i široku primjenu u većini europskih zemalja donošenjem europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju.

## 2.2 Općenito o lakom betonu

Betoni kod kojih se volumna masa kreće u rasponima od otprilike 600 - 1500 kg/m<sup>3</sup>, a mogu doseći i 2000 kg/m<sup>3</sup>, mogu se nazivati laki betoni. Zbog toga svojstva svrstavaju se u skupinu specijalnih betona jer se volumna masa običnih betona kreće u rasponima od 2400 - 2500 kg/m<sup>3</sup>. Do takvog smanjenja volumne mase dolazi zbog više razloga:

- stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata
- upotrebom agregata sa velikim sadržajem pora
- stvaranjem pora u mortu.

Manja volumna masa sa sobom nosi dobre i loše stvari, pa tako laki beton ima bolja izolacijska svojstva posebno izolaciju na toplinu, međutim njegova čvrstoća i otpornost na habanje su slabiji nego kod običnih betona te je općenito skuplji za proizvodnju i kompliciraniji za ugradnju. No uz sve nedostatke primjena lakog betona je velika, te u nekim specijalnim svrhama pokazuje svoje malobrojne, ali bitne vrline. [10]

### 2.2.1 Podjela lakih betona

Prema načinu postizanja manje volumne mase, laki betoni dijele se na:

- lake betone od jednakozrnatog agregata
- ćelijaste betone
- lakoagregatne betone. [10]

#### 2.2.1.1 Laki betoni od jednakozrnatog agregata

Jedna normalna frakcija kamenog agregata, primjerice 4-8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0,55-0,60. Zbog tako male volumne koncentracije agregata, u gotovom betonu ostaje mnogo šupljina. Za pripremu betona može se upotrijebiti i više od jedne frakcije agregata, ali se tada dobije manji sadržaj pora i veća volumna masa betona. Ovakav beton može se izrađivati i od lakog agregata.

Količina cementa za pripremu betona treba biti najmanje 250 kg/m<sup>3</sup>.

Beton od jednozrnatog agregata je otporan na mraz jer ima veoma malu količinu kapilarnih pora. Ovakav beton dobro apsorbira zvuk ako mu se površina ne zagladi. [11]

### 2.2.1.2 Čelijasti betoni

Čelijasti betoni su oni u čije je tijelo prije stvrdavanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji mjehurići ekspandiraju u betonu. Čelijasti betoni na bazi portland i metalurškog cementa čija je struktura porozna mogu se dobiti ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregati kao što su: pijesak, kvarc, škriljac, leteći pepeo, pucolan, itd. Gustoća ovakvih betona se kreće u granicama od 600 - 1200 kg/m<sup>3</sup>, a čvrstoća na pritisak od 3,5 do 10 MPa. Zbog velikih pora imaju odlična izolacijska svojstva, a uglavnom se koriste za ispune među glavnim konstruktivnim elementima i slično. Podjela čelijastih betona je sljedeća:

- pjenobetoni
- plinobetoni. [10]

### 2.2.1.3 Lakoagregatni betoni

Lakoagregatni betoni, kao što im i sam naziv kaže, dobivaju se smjesom betona s agregatima male težine. Agregati mogu biti prirodnog porijekla ili umjetni. Svi lakoagregatni betoni imaju sposobnost velikog upijanja vode. Prilikom pravljenja smjese betona agregat će ili upijati ili ispuštati vodu u smjesu što ovisi o tome koliko je bilo prvobitno vode u agregatu. Samim time određivanje količine vode u betonskoj mješavini potrebno je odrediti s velikom dozom opreza. Zrna lakog agregata se u mješavini mogu pojaviti sa velikim šupljinama, pa zbog manje volumne mase agregata od cementne paste često se dogodi da zrna isplivaju na površinu paste, odnosno dolazi do segregacije tipične za laki beton. Pri ovakvom slučaju treba paziti sa dodavanjem vode, te napraviti recepturu takvu da segregacija bude minimalna. Tipovi agregata koji se koriste za izradu lakoagregatnog betona su:

- prirodni
- ekspandirani i pečeni (umjetni)
- sekundarne sirovine.

Lakoagregatni betoni prema namjeni dijele se na toplinsko – izolacijske lake betone, konstrukcijsko – izolacijske lake betone i konstrukcijske lake betone. [5]

Liapor je prirodno čista i oko 180 milijuna godina stara glina iz razdoblja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U proizvodnom procesu ta se sirovina melje, miješa te oblikuje u kuglice koje se nakon oblikovanja peku na temperaturama od oko 1200 °C. Pri

tom procesu sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Takvi proizvodi su nezapaljivi i negorivi građevinski materijali koji se po standardu DIN 4102 svrstavaju u najviši požarni razred A1. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se za izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona. [10]

### **2.2.2 Svojstva lakih betona**

Laki beton ima manju čvrstoću i otpornost na habanje nego obični beton, zbog povećanog sadržaja pora, ali ima više drugih prednosti, kao što su manja volumna masa i izolacijska svojstva, posebno kao toplinska izolacija.

Trajnost mnogih vrsta lakog betona jednaka je trajnosti običnog betona.

Laki betoni imaju manji modul elastičnosti, veće puzanje i krtiji su nego običan beton. Ponašaju se gotovo linearno elastično, sve do pojave loma. Skupljanje i bubrenje lakih betona je veoma izraženo, naročito kod betona od lakog agregata. Posljedica toga je pojava mrežastih pukotina.

Manja čvrstoća lakog betona, povlači za sobom bolja izolacijska svojstva i obratno. Pri tome valja voditi računa da je laki beton jedino u suhom stanju dobar izolator topline. Povećanjem vlažnosti povećava mu se vodljivost.

#### **2.2.2.1 Liapor lagani betoni**

Liapor lagani betoni nude osnovu za prijelaz u nove dimenzije izazova i razvoja u graditeljstvu. U cjelini, njegove dobre osobine boljih su vrijednosti od običnog betona. Stoga, Liapor lagani betoni postižu bolja svojstva čvrstoće, gustoće, izdržljivosti i toplinske izolacije. Zbog svoje male težine, lagani betoni otvaraju arhitektima i projektantima iznenađujuće konstruktivne mogućnosti kod projektiranja i izvedbe vitkih, ekonomično dimenzioniranih, a ipak čvrsto nosivih građevinskih elemenata.

Za proizvodnju nearmiranih i armiranih laganih betona koriste se Liapor kuglice kojima su svojstva predodređena u procesu proizvodnje.

Osim što se Liapor lagani agregati od ekspandirane gline primjenjuju za izradu armiranih i nearmiranih laganih betona vrlo uspješno se primjenjuje i za izradu prednapetih

laganih betona svih razreda čvrstoća. Razlog tomu je što Liapor prednapeti lagani betoni ispunjavaju najviše zahtjeve prema standardima DIN EN 13055-1 i DIN V 20 000-104.

Liapor lagani betoni s gustom konzistencijom imaju velike mogućnosti prilagodbe. Stoga je moguća primjena na mnogo načina kako bi se zadovoljili različiti zahtjevi. Mnoge njihove vrijednosti temelje se na laganoj kamenoj jezgri u obliku Liapor kuglica. [12]



*Slika 2.4. Liapor [12]*

### **2.3 Trajnost betona s agregatom od recikliranih materijala**

Trajnosti betona se posvećuje sve više pozornosti jer se kod nas kao i u svijetu utvrđuje da agresivna okolina potiče, odnosno pospješuje propadanje betona. Iz tog razloga se već pri projektiranju koristi koncept po kojemu konstrukcija treba iskazivati odgovarajuću sigurnost, uporabljivost i nosivost tijekom svog životnog vijeka. Trajnost betona možemo predvidjeti poznavamo li okolinu kojoj je objekt izložen te mehanizme mogućih procesa propadanja. Ako su granični uvjeti poznati i dobro određeni, možemo očekivati da će i projektiranje trajnosti betona biti uspješno.

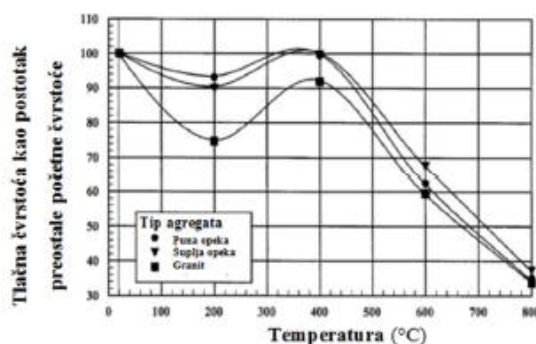
Trajnost materijala definirana je kao njegova sposobnost da se suprostavi različitim djelovanjima iz okoliša kojem je sam taj materijal izložen. Životni vijek konstruktivnih i nekonstruktivnih materijala ovisi o njihovoj izdržljivosti u uvjetima u kojima su izloženi različitim kemijskim, mehaničkim, fizičkim i biološkim procesima razaranja. Budući da trajnost ovisi o više parametara kao što su sastav i struktura materijala s jedne strane i utjecajima okoliša kojima je izložen s druge strane, nije ga moguće kvantificirati i kao takvog staviti u proračun. Osim sastava i strukture važni parametri koji utječu na trajnost materijala, u slučaju betona, su i svojstva poroznosti, apsorpcije, te propusnosti za fluide i plinove. Trajnost se ostvaruje pravilnim projektiranjem konstrukcije, odabirom materijala, izvođenjem i održavanjem. [13]

### 2.3.1 Otpornost na požar

Betonski elementi ne proizvode dim niti emitiraju bilo kakve štetne plinove u okolinu tijekom požara, a osim toga spriječavaju zagrijavanje susjednih soba i prostorija. Beton, zajedno sa svojim komponentama, prema normi HRN EN 13501-1, spada u najviši razred otpornosti prema djelovanju požara A1.

Pri tipičnom požaru, temperature dosežu oko 500°C unutar 10 minuta, i 950°C za 1 sat pa beton mora imati dovoljnu otpornost kako bi podnio nagli porast temperature kao i najveću temperaturu kojoj je izložen. Brz porast temperature tijekom požara uzrokuje porast tlaka energije u porama betona i može uzrokovati eksplozivno ljuštenje betonske površine. Do te pojave dolazi najčešće tijekom prvih 30 minuta izlaganja visokoj temperaturi. Beton nastavlja s degradacijom formiranjem kontinuiranih pukotina. Tijekom požara pri uobičajenim temperaturama od oko 900°C samo vanjski slojevi betonskih elemenata postaju drastično vrući dok unutarnji slojevi ostaju hladniji i tako štite armaturu.

Reciklirana drobljena opeka pokazala se kao agregat za beton s dobrim svojstvima u uvjetima izloženosti požaru. U takvim uvjetima izloženosti, beton s recikliranom opekom pokazao je znatno bolje reakcije na visoke temperature od betona s prirodnim riječnim ili drobljenim agregatom (granit, dolomit). Agregat nastao drobljenjem opeke termički je stabilan te je moguće da je upravo to svojstvo razlog dobrog ponašanja kao agregata u betonu izloženom visokim temperaturama. Mali koeficijent toplinske provodljivosti betona s recikliranom opekom također ukazuje na njegovu vatrootpornost. Zbog manjeg koeficijenta toplinske provodljivosti, armirani beton je puno bolje zaštićen od ranog zagrijavanja pri upotrebi betona s recikliranom opekom nego pri upotrebi betona s prirodnim agregatom. [13]



Slika 2.5. Redukcija tlačne čvrstoće betona normalne početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama [13]



### 3 POŽARNA OTPORNOST

Materijali od kojih je konstrukcija sastavljena uvelike utječu na razinu oštećenja koja će se javiti uslijed djelovanja požara na konstrukciju. Beton kao cjelina, u odnosu na druge materijale, ima najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama jer ne oslobađa toksične plinove, ima malu toplinsku provodljivost te kao materijal spada u skupinu negorivih materijala. S obzirom da je najveći udio u betonu zapravo agregat, jako je važno njegovo ponašanje na visokim temperaturama.

Najmjerodavniji i najčešće promatrani podatak kod betona je tlačna čvrstoća. Tema mnogih znanstvenih radova je njeno ispitivanje nakon zagrijavanja uzoraka, te procesa hlađenja. Na temelju dosadašnjih ispitivanja uočeno je da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, i takvo ponašanje je najizraženije u intervalu temperature od 300°C do 360°C. Valja napomenuti kako utjecaj različitog načina hlađenja uzoraka znatno utječe na konačni rezultat mehaničkih svojstava betona. Uzorci naglo hlađeni vodom pokazuju veće smanjenje tlačne čvrstoće u odnosu na iste uzorke hlađene postepeno na zraku.

Kod ispitivanja armiranobetonskih uzoraka, na temelju dosadašnjih ispitivanja, uočeno je da beton ima prihvatljivo ponašanje do temperature od 300°C, ali ni preko te temperature ne dolazi do pojave loma u betonu, već uzrok sloma konstrukcije najčešće se događa uslijed gubitka nosivosti armature. Beton na višim temperaturama mijenja boju te mu se smanjuju rezidualna mehanička svojstva, u ovisnosti o sastavu betona i načinu hlađenja neposredno nakon izvlačenja uzoraka iz peći.

Uslijed povišene temperature povećava se tlak vode, te može doći do eksplozivnog ljuštenja unutar strukture betona ukoliko tlak vodene pare premaši graničnu vrijednost koju beton može podnijeti. U betonu izloženom djelovanju visokih temperatura dolazi do kemijskih promjena u cementnoj pasti, koja ima jako veliki udio u sastavu betona. Temperatura zagrijavanja i vremensko trajanje, sastav betona kao i način hlađenja uzoraka utječu na promjene u kemijskom sastavu te dolazi do promjene dimenzija betona. Sve gore navedene promjene povezani su mehanizmi koji dovode do sloma konstrukcije.

Kemijske promjene agregata i minerala iz očvrslje cementne paste događaju se ovisno o temperaturi zagrijavanja betona. Od 400°C dolazi do dehidracije kalcij-hidroksida u očvrslj cementnoj pasti prema sljedećoj relaciji:  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Raspadanje cementne paste dovodi do kolapsa u betonu, s obzirom da je njen udio jako velik u sastavu betona. Povećani tlak vodene pare samo dodatno ubrzava proces razaranja.



Promjene dimenzija betona uslijed promjene temperature nastale kao posljedica klimatskih uvjeta, u projektiranju i izvođenju konstrukcije uzimaju se u obzir postavljanjem pomičnih ležajeva koji dopuštaju određeni pomak. Međutim, kod požarnog djelovanja radi se o znatno višim temperaturama i promjene dimenzija su izraženije. Ukoliko je prostor predviđen za promjenu duljine nedovoljan, pojavljuju se sekundarni momenti, te nakraju i kolaps konstrukcije.

### 3.1 Djelovanje požara na beton

Pri djelovanju požara moraju se uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi. U ovom poglavlju prikazani su zahtjevi prema propisanoj normi HRN EN 1992-1-2:1995+AC:1996, koji se postavljaju na beton pri izlaganju požaru. Između ostalog, dane su veličine za umanjene karakteristične tlačne čvrstoće betona pri djelovanju požara na beton te ostali zahtjevi koje je potrebno poštivati pri projektiranju armiranobetonskih konstrukcija u požarnim situacijama.

Umanjenje karakteristične tlačne čvrstoće betona kao funkcije temperature  $\Theta$ , određeno je koeficijentom  $k_c(\Theta)$  prema jednadžbi:

$$f_{ck}(\Theta) = k_c(\Theta) f_{ck}(20^\circ\text{C})$$

U pomanjkanju točnijih podataka, za beton sa silicijskim agregatom primjenjuju se niže navedene veličine za  $k_c(\Theta)$ . Te su vrijednosti na strani sigurnosti za druge vrste betona. [5]

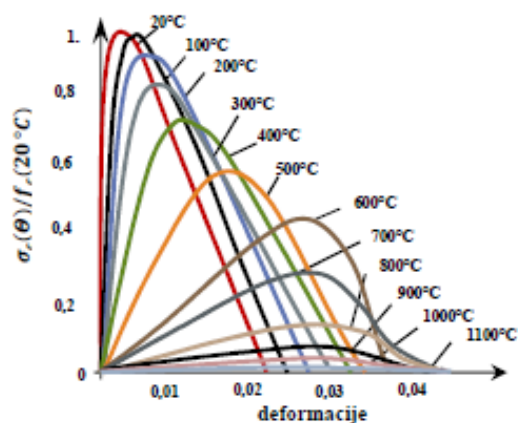
$$k_c(\Theta) = 1,0 \text{ za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$k_c(\Theta) = (1600 - \Theta) / 1500 \text{ za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 400^\circ\text{C}$$

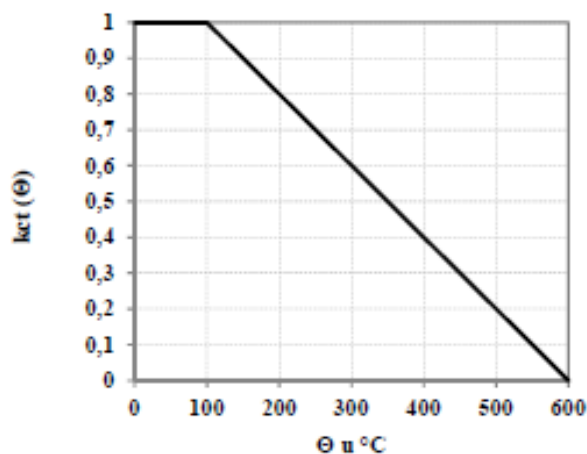
$$k_c(\Theta) = (900 - \Theta) / 625 \text{ za } 400^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 900^\circ\text{C}$$

$$k_c(\Theta) = 0 \text{ za } 900^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

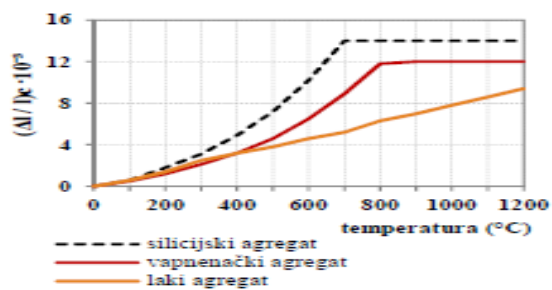
S porastom temperature dolazi do promjene toplinskih svojstava betona. Ukupno toplinsko produljenje betona  $\Delta l/l$  računajući od  $20^\circ\text{C}$  može se odrediti prema slici 3.3. i jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004. [5]



Slika 3.1. Odnos naprezanje-deformacije na beton pri jednoosnom tlaku kod povišenih temperatura [5]



Slika 3.2. Koeficijent  $k_c(\theta)$  kojim se uzima u obzir umanjeње vlačne čvrstoće betona,  $f_{ctk}$ , pri povišenim temperaturama [5]

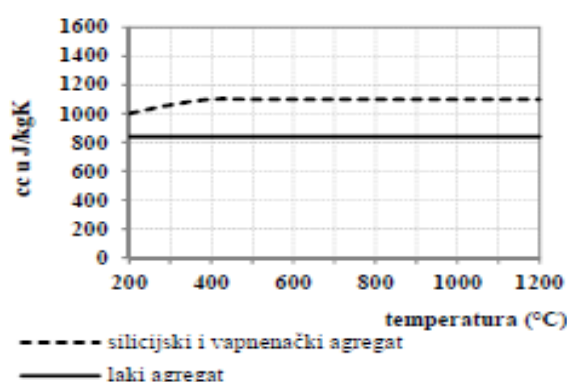


Slika 3.3. Ukupno toplinsko produljenje [5]

Ako se zahtjeva samo približan odgovor (pri jednostavnim proračunima i procjenama), koeficijent toplinskog produljenja,  $\alpha_c = (d(\Delta l/l))/d\Theta$ , može se uzeti kao neovisan o temperaturi betona i to:

- za beton sa silicijskim agregatom:  $\alpha_c = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$
- za beton s vapnenačkim agregatom:  $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$
- za lakoagregatni beton:  $\alpha_c = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$

Iz slike 3.3 možemo vidjeti da je toplinsko produljenje sa porastom temperature kod betona normalne težine veće od toplinskog produljenja kod lakoagregatnog betona. [5]



Slika 3.4. Specifična toplina betona [5]

Specifična toplina betona raste s porastom temperature, dok kao posljedica toga toplinska provodljivost opada. Ona se u proračunu požarne otpornosti betona može uzeti u obzir prema jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004 ili prema slici 3.4. Treba napomenuti da se pri izradi dijagrama prikazanog na slici 3.3. sadržaj vlage u betonu razmatra na razini ravnotežne vlage i da viši sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona. [5]

Ako se sadržaj vlage ne razmatra na razini ravnoteže topline i mase, za funkciju danu za specifičnu toplinu betona,  $c_{c \text{ peak}}$ , sa silicijskim i vapnenačkim agregatom mogu se uzeti najveće vrijednosti koje se nalaze između 100 °C i 200°C, i to:

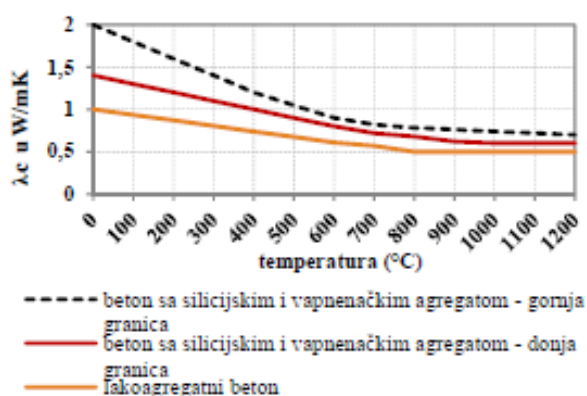
$c_{c \text{ peak}} = 1875 \text{ J/kgK}$ , ako je vlažnost 2 % od težine betona, odnosno

$c_{c \text{ peak}} = 2750 \text{ J/kgK}$ , ako je vlažnost 4 % od težine betona.

Ako se zahtjeva samo približan podatak može se uzeti da je specifična toplina neovisna o temperaturi betona i da iznosi  $c_c = 1000 \text{ J/kgK}$  za beton sa silicijskim i vapnenačkim agregatom, a  $c_c = 840 \text{ J/kgK}$  za lakoagregatni beton. [5]

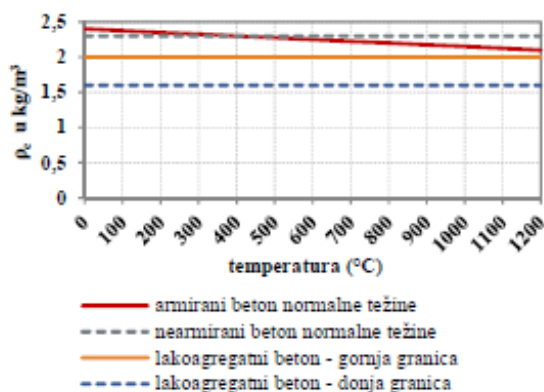
Toplinska vodljivost betona,  $\lambda_c$ , može se uzeti prema jednadžbama u Dodatku A norme HRN ENV 1992-1-2:2004, a također i prema slici 3.5. na kojoj su spomenute jednadžbe prikazane. Ako se zahtijeva samo približan podatak, može se uzeti da je toplinska vodljivost neovisna o temperaturi i to:

- za beton sa silicijskim agregatom:  $\lambda_c = 1,60 \text{ W/mK}$ ,
- za beton sa vapnenačkim agregatom:  $\lambda_c = 1,30 \text{ W/mK}$ ,
- za lakoagregatni beton:  $\lambda_c = 0,80 \text{ W/mK}$ . [5]



Slika 3.5. Toplinska vodljivost betona [5]

Gustoća betona,  $\rho_c$ , za statička opterećenja po EN 1994-1-2:2005 smatra se neovisnom o porastu temperature betona te se može odrediti prema prethodno navedenoj normi. Promjena gustoće se kod toplinskog odgovora uvažava s porastom temperature kako je to prikazano slikom 3.6. Zbog isparavanja vode može se uzeti da se gustoća smanjuje za  $100 \text{ kg/m}^3$  za temperature preko  $100^\circ\text{C}$ . Sadržaj vlage u betonu može se uzeti jednakim sadržaju ravnotežne vlage. Ako takvi podatci ne postoje, može se uzeti da sadržaj vlage iznosi  $\leq 2 \%$  od težine betona. Visoki sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona, ali povećava opasnost odlamanja. [5]



Slika 3.6. Gustoća betona pri visokim temperaturama [5]

Osim promjena mehaničkih i toplinskih svojstava betona, pojavljuju se promjene i u njegovom površinskom izgledu, a manifestiraju se kao ljuštenje površine i pojava pukotina. Ljuštenje betona može biti površinsko, može doći do eksplozivnog odlamanja, odvajanje uglova, stvaranje depresija, a do ljuštenja može doći i nakon hlađenja. Najopasnije je naravno eksplozivno odlamanje jer dolazi do odvajanja komadića betona s učinkom eksplozije. Eksplozivno odlamanje je najčešće prouzročeno podizanjem tlaka vode u porama betona i uslijed toga prekoračenjem njegove vlačne čvrstoće tijekom požara, a karakteristično je da se pojavljuje u prvih 30 minuta. [5]

Do pojave pukotina dolazi uslijed naglog povećanja ili smanjenja temperature betona. Primjerice uslijed procesa naglog hlađenja betona tijekom gašenja požara dolazi do naglog stezanja dijelova površine betona što rezultira pojavom pukotina. Također nakon izlaganja betona visokoj temperaturi već od 100°C uslijed različitog istezanja agregata i cementne paste dolazi do formiranja mikropukotina po površini elementa. Pojavom pukotina omogućen je prolaz visokih temperatura u unutrašnjost betona te daljnje oštećenje betona. Beton i armatura se uslijed izloženosti visokim temperaturama počinju različito istežati. Armatura se isteže brže te dolazi do stvaranja dodatnih vlačnih naprezanja u blizini armature i u konačnici pojave pukotina. [5]

### **3.2 Djelovanje požara na konstrukcije**

Primarni cilj požarne zaštite je ograničiti rizik pri djelovanju požara na osobe, okolne građevine i na samu promatranu građevinu. Elaborat zaštite konstrukcije od požara je sastavni dio svakog glavnog projekta. U njemu mora biti naveden sustav automatskog gašenja požara (npr. Sprinkler sustav) te plan evakuacije. U razradi plana evakuacije potrebno je osigurati normama propisane dimenzije prolaza, vrata itd. u ovisnosti koliko je ljudi predviđeno projektom da će boraviti u tom prostoru. Sukladno s tim, građevina mora biti projektirana i izvedena da u slučaju izbijanja požara zadovoljava sljedeće:

- nosivost građevine mora ostati sačuvana tijekom normom propisanom vremenu
- ograničeno je širenje dima i vatre unutar objekta. To se najčešće rješava izradom protupožarnih vrata koja odjeljuju požarne sektore
- spriječava se širenje dima i vatre na okolne građevine
- potrebno napraviti detaljan plan evakuacije ljudi iz objekta

- potrebno osigurati sigurnost i dostupnost protupožarnih aparata korisnicima objekta, kao i spasilačkim ekipama

Pod konstrukcijom objekta spadaju sve nepokretne i pokretne konstrukcije, odnosno potrebno je dostaviti atest materijala koji se koriste u objektu ali nisu dio ugrađenih materijala u samu konstrukciju objekta, a sve u svrhu izdavanja uporabne dozvole.

Prema normi HRN ENV 1992-1-2:2004, traženi zahtjevi na ponašanje konstrukcije u požaru su:

- ako konstrukcija prema zahtjevu mora imati mehaničku otpornost u uvjetima požara, one se proračunavaju i izvede tako da im nosiva konstrukcija ima zahtjevanu nosivost za vrijeme izloženosti požaru – kriterij „R“
- ukoliko je potrebno izvesti požarne odjeljke, isti moraju biti od protupožarnog materijala da ne nastupi gubitak cjelovitosti uzrokovan pukotinama, koje su veličine dovoljne da se dopusti prodor vrućeg dima i plamena. Ne smije doći do gubitka izolacijskih svojstava uzrokovanih temperaturom koja premašuje graničnu vrijednost temperature koju određeni materijal može podnijeti – kriterij „E“
- srednji porast temperature pri standardnoj izloženosti požaru na izloženoj površini ne premašuje 140 K i najveći porast temperature nije veći od 180 K- kriterij „I“

Ponašanje materijala na visokim temperaturama ovisi o samoj građi i sastavu istih. Pri razvoju požara razvijaju se temperature i do 1200°C.

Za svaki projekt potrebno je izraditi elaborat zaštite od požara. Proračun koji obuhvaća djelovanje požara na konstrukciju mora imati:

- odgovarajuću proračunsku situaciju
- odgovarajuće opterećenje izazvano požarom
- proračun ponašanja materijala ugrađenih u konstrukcijskim elementima opreme
- proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije kao cjeline izložene požaru

U proračunima unutrašnjih sila i momenata konstrukcije, odnosno u proučavanju općenito ponašanja konstrukcije na požar uzima se da je djelovanje kao takvo na konstrukciju izvanredno. Dakle potrebno je u cjelokupnom konceptu sigurnosti uključiti i izvanredno požarno djelovanje. Njegovo djelovanje se množi s faktorom djelovanja čija je vrijednost 1.0, suprotno stalnom i promjenjivom djelovanju koje se množi u ovisnosti da li se radi o povoljnom ili nepovoljnom sa faktorima koji u slučaju nepovoljnog povećavaju vrijednost opterećenja za

25 % - 50 % početne vrijednosti. Valja uzeti u obzir ponašanje konstrukcije u ovisnosti o vremenu i opterećenju prije izvanredne situacije. Ukoliko je objekt podijeljen na požarne odjeljke, potrebno je procijeniti proračunski požar za svaki od odjeljaka zasebno. Dakle, svaki od navedenih požarnih odjeljaka mora zadovoljavati normom propisanu požarnu otpornost, a sve s ciljem da cjelokupna konstrukcija zadovoljava tražene karakteristike.

## 4 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA BETONA NA POŽAR

### 4.1 Samozbijajući lagani beton na visokim temperaturama (Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy)

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja laganog samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski krupnom agregatu, nakon utjecaja visokih temperatura. Nakon izlaganja betona temperaturi od 800°C, zabilježene su promjene u tlačnoj čvrstoći betona kao i gubitak težine promatranih uzoraka. Istraživanje je provedeno na uzorcima betona s dodatkom kokosovih ljuski u različitim omjerima, koji su se koristili kao zamjena za krupni agregat. Za pripremanje mješavina betona upotrebljeni su pepeo rižinih ljuski i silikatna prašina. Rezultati su pokazali da se svojstva očvrslulog betona smanjuju na temperaturama većim od 400°C.

#### 4.1.1 Uvod

Agregat čini gotovo 60 % ukupnog volumena betona. Proizvodnja betona zahtijeva veliku količinu prirodnih sirovina. Iz svih krajeva svijeta dolaze prijedlozi da se alternativni materijali primjenjuju umjesto uobičajenih agregata. Smatra se kako bi lagani agregat uskoro mogao postati zamjena za krupni agregat. Primjenom betona od laganog agregata smanjuje se veličina konstrukcijskih elemenata. Kokosova ljuska (eng. *Coconut Shell* - CS) organski je materijal dobiven iz poljoprivredne industrije, a prikladna je zamjena za uobičajeno korišteni agregat. Indija zauzima jednu četvrtinu svjetske proizvodnje kokosa, a nakon njegove obrade ostaje više od 10 milijuna tona otpada. Agregat od kokosovih ljuski (eng. *Coconut Shell Aggregate* – CSA) laganiji je od standardnog agregata, a gustoća mu je 1750 kg/m<sup>3</sup>. U literaturi se navodi da se i ljuske palminih plodova mogu koristiti kao krupni agregat u laganom betonu. Agregat od kokosovih ljuski je uz ljuske palminih plodova sve češće korišten kao lagani agregat u betonu. Usporedna istraživanja su pokazala da agregat od kokosovih ljuski ima bolju čvrstoću i trajnost, nego onaj dobiven od ljuski palminih plodova. U svijetu je samo nekoliko radova koji su obradili primjenu poljoprivrednog otpada kao laganog agregata u standardnom betonu.

Samozbijajući beton (eng. *Self compacting Concrete* - SCC) građevni je materijal budućnosti, a predstavlja jedno od najvećih postignuća u tehnologiji betona u posljednja dva desetljeća. Pouzdan je konstrukcijski materijal, njegovom ugradnjom ne pojavljuje se segregacija te ima visoki stupanj tečnosti i trajnosti. Obavija armaturu bez ikakvih mehaničkih vibracija potrebnih za ispunjavanje oplate. Radi sprječavanja pojave segregacije samozbijajućeg betona tijekom tečenja, veličina krupnog agregata uzima se između 12 i 16 mm,



umjesto 20-25 mm za normalni beton, što smanjuje težinu krupnog agregata. Zaključak je da su lagani agregati prikladni za pripremu samozbijajućeg betona. Djelovanje agregata od kokosovih ljuski na proizvodnju laganog SCC betona još nije detaljno ispitano. U ovom radu je ispitana primjenjivost kokosovih ljuski kao agregata u laganom betonu. Kao dio toga, provedeno je ispitivanje utjecaja visoke temperature na svojstva lakog betona s agregatom od kokosovih ljuski, s obzirom na činjenicu da poljoprivredni otpad izložen visokoj temperaturi brzo izgara. Proučavanje požarnih svojstava betona je neizbježno, a ona uvelike ovise o materijalima od kojih se beton proizvodi. Tanyildizi i Coskun zaključili su da jedino lagani beton s dodatkom letećeg pepela može izdržati temperature veće od 400°C. Tlačna i vlačna čvrstoća betona s dodatkom silikatne prašine smanjuju se pri temperaturi od 200°C. Ovaj rad opisuje utjecaj visoke temperature na mehanička svojstva samozbijajućeg betona s agregatom od kokosovih ljuski.

#### 4.1.2 Materijali i metode

##### 4.1.2.1 Materijali

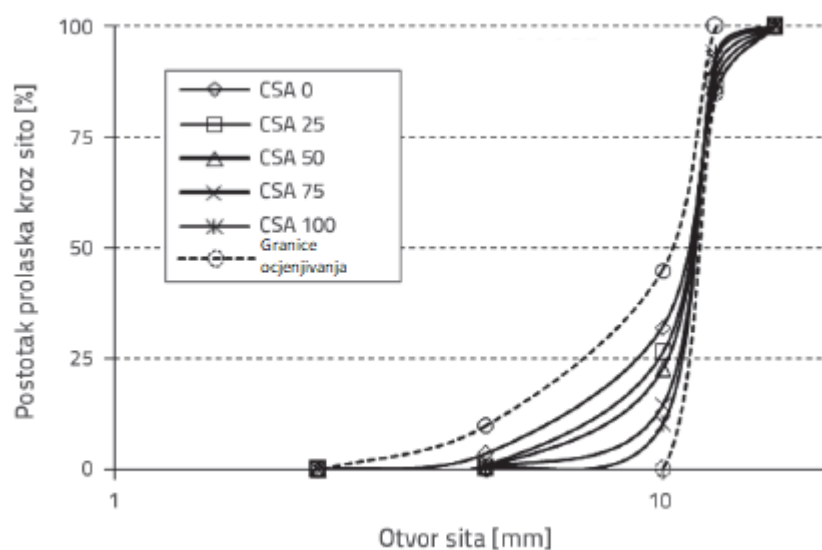
U ovom istraživanju korišten je obični portland cement (eng. *Ordinary Portland Cement* - OPC) marke 43. Pepeo rižinih ljuski (eng. *Rice husk ash* - RHA) mineralna je organska primjesa koja se primjenjuje za pripremu prve referentne betonske mješavine, a kombinacijom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (eng. *Silica fume* - SF) priprema se druga referentna betonska mješavina. Specifična težina cementa iznosi 3,15, pepela rižinih ljuski je 2,92, a silikatne prašine 2,28. Finoća cementa iznosi 2950 cm<sup>2</sup>/g, pepela rižinih ljuski 3170 cm<sup>2</sup>/g, a silikatne prašine 21 650 cm<sup>2</sup>/g. Kemijski sastav cementa i drugih mineralnih primjesa je procijenjen mikroanalizom X-zrakama, a prikazan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Kemijski sastav cementa i mineralnih primjesa [14]

Kemijski sastav Materijali	SiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	CaO [%]	MgO [%]	Gubitak mase žarenjem [%]
Cement	22,40	5,20	3,80	61,60	1,70	1,40
Pepeo rižinih ljuski	91,85	0,31	0,26	0,78	0,55	3,49
Silikatna prašina	87,10	0,78	2,10	0,90	1,40	1,09

Za sitni agregat upotrijebljen je pijesak s lokalne rijeke Cauvery, modula finoće 2,67, koji pripada graničnoj zoni II, prema normama IS IS:383-1978, a njegova specifična težina iznosi 2,71. Kao krupni agregat korišten je plavi granit, zrna veličine 12 mm. Modul finoće agregata bio je 7,19, a specifična težina 2,78. Izmjerena gustoća krupnog agregata iznosila je

2172 kg/m<sup>3</sup>. Kokosove ljuske dostavljene su s lokalnog polja i sušene na suncu mjesec dana, nakon čega su drobljene. Oprane frakcije kokosovih ljuski potom su sušene na sobnoj temperaturi još mjesec dana. Oblik frakcije suhe kokosove ljuske je paraboličan i ljuskast, površina je konkavna i konveksna, a rubovi su oštri i šiljasti. Veličina frakcija je između 3 i 5 mm. Slika 4.1. prikazuje rezultate raspodjele veličine čestica krupnog agregata (od 5 mm do 12 mm) te zamjenski agregat od kokosovih ljuski u različitim omjerima (25 %, 50 %, 75 % i 100 %).



Slika 4.1. Granulometrijske krivulje agregata (CSA – agregat od kokosovih ljuski) [14]

Gustoća kokosovih ljuski je 1683 kg/m<sup>3</sup>, a specifična težina iznosi 1,71. Polikarboksilni superplastifikator (eng. *Superplasticizer* - SP) specifične težine 1,07 primijenjen je da bi se postigla željena obradivost betona. Slike 4.2.a) i 4.2.b) prikazuju agregat od kokosovih ljuski i standardne aggregate od granita korištene u eksperimentalnom ispitivanju.



Slika 4.2. Krupni agregati: a) agregat od kokosovih ljuski; b) agregat od granita [14]

#### 4.1.2.2. Sastav mješavine

U ovom istraživanju ispitane su dvije vrste betonskih mješavina s ukupnim udjelom praha od  $450 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $550 \text{ kg/m}^3$ . Cement, pepeo rižinih ljuski i silikatna prašina sortirani su za pripremu prve, odnosno druge referentne mješavine betona. Pepeo rižinih ljuski upotrijebljen je kao zamjena za cement kod pripreme prve referentne mješavine, a superplastifikator je dodan u drugu mješavinu s promijenjenim udjelom pepela rižinih ljuski i cementa. Nakon nekoliko pokušaja s predloženom modificiranom metodom projektiranja sastava mješavine za pripremu laganog samozbijajućeg betona, koju su predložili Su i Miao te Choi i suradnici, određene su konačne kombinacije sastojaka mješavina SCC450 i SCC550. Sastavi mješavina prikazani su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Sastav mješavine samozbijajućeg betona [14]

Oznaka mješavine		Sastav [ $\text{kg/m}^3$ ]					v/c	Superplastifikator [ $\text{kg/m}^3$ ]
		Cement	Pepeo rižinih ljuski (RHA)	Silikatna prašina (SF)	Pijesak	Krupni agregat (CA)		
SCC450 (1 : 1.89 : 2.09)	Prva (B450)	330	120	-	850	940	0,35	2,61
	Druga (B450)	318	100	32			0,37	2,68
SCC550 (1 : 1.47 : 1.56)	Prva (T550)	400	150	-	810	860	0,33	2,61
	Druga (T550)	385	125	40			0,35	2,68

Suhe frakcije kokosovih ljuski upotrebljene su u omjeru 25 %, 50 %, 75 % i 100 % u odnosu na krupni agregat. Vodovezivni omjer određen je na temelju zapreminske mase praškastih materijala u mješavini. Tablica 4.3. prikazuje udjele sastojaka u mješavinama s agregatom od kokosovih ljuski.

Tablica 4.3. Sastav mješavine laganog samozbijajućeg betona [14]

Mješavina	Zamjena za cement (C) [ $\text{kg/m}^3$ ]	Pijesak (FA) [ $\text{kg/m}^3$ ]	Krupni agregat (CA) [ $\text{kg/m}^3$ ]		Agregat od kokosovih ljuski (CSA) [ $\text{kg/m}^3$ ]		Omjer (C : FA : CA : CSA)
			%	Wt.	%	Wt.	
SCC450	450	850	100	940	0	0	1 : 1,89 : 2,09 : 0
			75	705	25	90.5	1 : 1,89 : 1,57 : 0,2
			50	470	50	181	1 : 1,89 : 1,04 : 0,4
			25	235	75	271.5	1 : 1,89 : 0,52 : 0,6
			0	0	100	362	1 : 1,89 : 0 : 0,8
SCC550	550	810	100	860	0	0	1 : 1,47 : 1,56 : 0
			75	645	25	131	1 : 1,47 : 1,17 : 0,24
			50	430	50	262	1 : 1,47 : 0,78 : 0,48
			25	215	75	393	1 : 1,47 : 0,39 : 0,71
			0	0	100	524	1 : 1,47 : 0 : 0,95

#### 4.1.2.2 Ispitivanje

Test rasprostiranja slijeganjem proveden je kako bi se odredili promjeri betonske mješavine D1 i D2 u dva okomita smjera, sukladno normi EN 12350-8.

Ispitivanje V-lijevkom provedeno je prema normi EN 12350-9, kako bi se procijenila sposobnost tečenja laganog samozbijajućeg betona, mjerenjem vremena tečenja betona kroz V-lijevak, pod utjecajem vlastite težine. Za procjenu sposobnosti prolaska betona, prema normi EN 12350 – 10, provedeno je ispitivanje L-kutijom. Koeficijent blokiranja tečenja pokazao je sposobnost zaobilaženja prepreka (kroz gustu armaturu i usku oplatu). Ukoliko je taj koeficijent veći od 0,8, samozbijajući beton ima dobru sposobnost prolaska. Gustoća betona izmjerena je u uzorcima koji su njegovani 28 dana, prema Arhimedovom zakonu, mjerenjem mase zasićenih uzoraka u vodi i na zraku, te mjerenjem mase u suhom stanju (uzorci su izloženi temperaturi od 105°C dok nije ostvarena stalna težina). Na betonskim kockama dimenzija 100 mm x 100 mm x 100 mm određen je utjecaj promjene temperature na tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća ispitana je u tlačnoj preši kapaciteta 2000 kN, prema propisu IS: 516-1959. Čvrstoća je određena dijeljenjem vrijednosti opterećenja, pri kojim se pojavljuju pukotine, s površinom uzorka, a uzet je u obzir prosječan rezultat triju ispitanih uzoraka. Uzorci su njegovani u vodi 28 dana, a potom podvrgnuti temperaturama od 100 °C, 200 °C, 400 °C i 800 °C, u električnoj pećnici s prirastom temperature od 2,5°C po minuti. Kada je postignuta ciljana temperatura, uzorci su zadržani na istoj temperaturi sljedećih sat vremena, kako bi se postiglo ravnotežno toplinsko stanje unutar strukture uzoraka. Nakon toga ostavljeni su da se hlade pri sobnoj temperaturi. Ohlađenim uzorcima ispitana je tlačna čvrstoća. Promjena mase uzoraka određena je pomoću razlike između početne mase prije zagrijavanja uzoraka ( $w_i$ ) i konačne mase uzoraka nakon hlađenja ( $w_h$ ), s obzirom na početnu masu uzoraka s točnošću od 0,01 g.

### 4.1.3 Rezultati i analiza

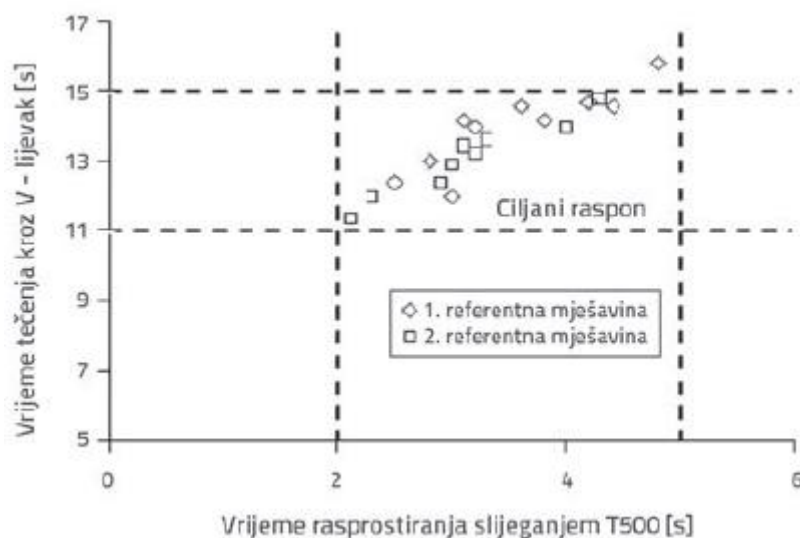
#### 4.1.3.1 Utjecaj agregata od kokosovih ljuski na svojstva svježeg betona

Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem provedeno je kako bi se odredila homogenost i obradivost laganog samozbijajućeg betona. Rezultati su prikazani u tablici 4.4.

*Tablica 4.4. Vrijednosti rasprostiranja slijeganjem i gustoće samozbijajućeg betona [14]*

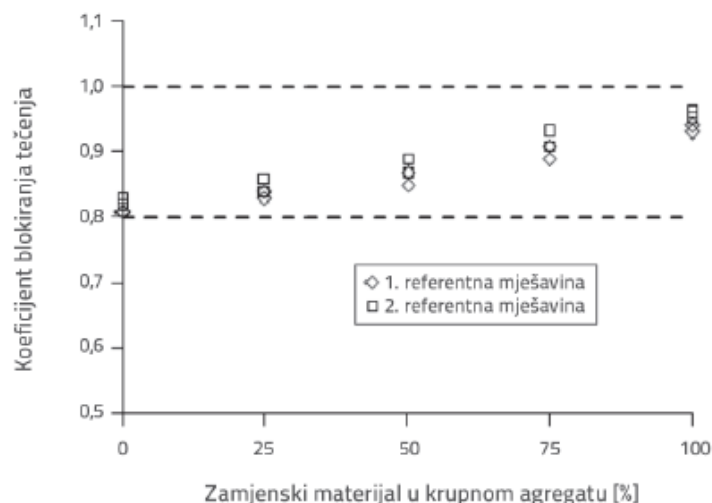
Oznaka mješavine		Ispitivanje	Udio kokosovih ljuski u krupnom agregatu				
			0 [%]	25 [%]	50 [%]	75 [%]	100 [%]
LWSCC450	Prva (B450)	Rasprostiranje [mm]	680	705	736	758	780
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2270	2050	1925	1840	1765
	Druga (T450)	Rasprostiranje [mm]	700	725	748	765	795
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2220	2025	1890	1810	1735
LWSCC550	Prva (B550)	Rasprostiranje [mm]	705	715	735	760	785
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2305	2070	1950	1845	1775
	Druga (T550)	Rasprostiranje [mm]	720	735	745	770	795
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2265	2030	1910	1825	1740

Svaka mješavina betona čije je rasprostiranje slijeganjem manje od 500 mm (prosječan promjer betonskog kruga) ima malu sposobnost tečenja. Vrijednost rasprostiranja slijeganjem koja iznosi 500 do 600 mm pokazuje da mješavina mijenja viskoznost i razvija fluidnost. Kada fluidnost dosegne 600 mm, viskoznost je optimalna, a mješavina teče slobodno pod utjecajem vlastite težine. Kao što je prikazano u tablici 4.4., vrijednost rasprostiranja slijeganjem iznosila je 650 mm i 800 mm, što je u rasponu ciljanih vrijednosti. Vrijednosti kontrolne mješavine betona (bez dodatka kokosovih ljuski) iznosile su 680 mm za mješavinu B450, 700 mm za mješavinu T450, 705 mm za mješavinu B550 te 720 mm za mješavinu T550. Zaključeno je da se povećanjem udjela kokosovih ljuski u sastavu betona povećava i vrijednost rasprostiranja slijeganjem. Vrijednost rasprostiranja slijeganjem agregata koji sadrži samo kokosove ljuske iznosila je 780 mm za prvu referentnu mješavinu betona s dodatkom pepela rižinih ljuski, 795 mm za drugu referentnu mješavinu s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (B450 i T450), a za mješavine B550 i T550 vrijednosti su bile izvan prihvatljivih za samozbijajući beton. Ispitivanjem V-lijevkom određena je sposobnost tečenja betona u svježem stanju i vrijeme potrebno da samozbijajući beton teče kroz V-lijevak pod utjecajem vlastite težine. Optimalne vrijednosti vremena su u intervalu od 11 do 15 sekundi. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak do postizanja otpornosti na segregaciju prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak [14]

Rezultati su unutar traženih vrijednosti, što znači da sve betonske mješavine imaju dobru viskoznost i otpornost na segregaciju, osim kontrolne mješavine s ukupnim udjelom praha  $450 \text{ kg/m}^3$ . Isprekidana linija na slici 4.4. označava kritičnu vrijednost koeficijenta blokiranja tečenja ( $H_2/H_1$ ), a područje  $H_2/H_1 > 0,8$  naziva se zona slobodnog tečenja. Rezultati koeficijenta blokiranja tečenja prikazani su na slici 4.4., a agregat od kokosovih ljuski ispunio je sve zahtjeve za samozbijajući beton, s obzirom na ispitivanje L-kutijom. Dakle, lagani samozbijajući beton s agregatom od kokosovih ljuski ima dobru sposobnost tečenja te dobru otpornost na segregaciju.



Slika 4.4. Koeficijent blokiranja tečenja laganog samozbijajućeg betona [14]

#### 4.1.3.2 Utjecaj kokosovih ljuski na gustoću betona

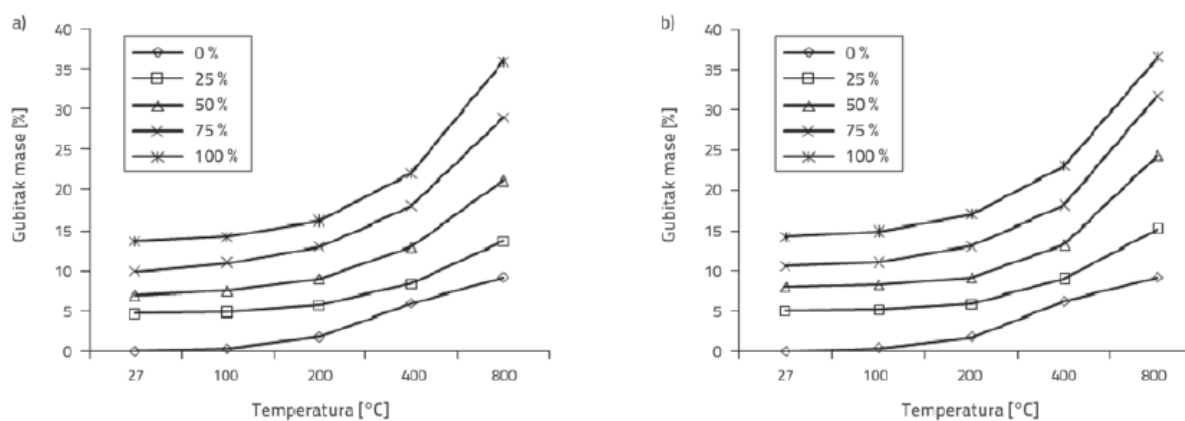
Gustoća uzoraka njegovanih 28 dana prikazana je u tablici 4.4. Gustoća samozbijajućeg betona smanjivala se s porastom udjela kokosovih ljuski u krupnom agregatu. Gustoća mješavine B450 bez dodatka kokosovih ljuski, nakon 28 dana njegovanja iznosi  $2060 \text{ kg/m}^3$ , a mješavine B550 iznosi  $2090 \text{ kg/m}^3$ . Gustoća mješavina T450 i T550 bez dodatka kokosovih ljuski iznosi  $2005 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $2025 \text{ kg/m}^3$ . Prema propisima ASTM C 330, težina laganog betona ne bi trebala prelaziti  $1850 \text{ kg/m}^3$  u suhom stanju, a obično ta vrijednost iznosi od  $1400 \text{ kg/m}^3$  do  $1850 \text{ kg/m}^3$ . U mješavini B450, u kojoj udio kokosovih ljuski u agregatu iznosi 75 %, odnosno 100 %, gustoća se smanjila ispod praga za lagani beton i iznosila je  $1840 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $1765 \text{ kg/m}^3$ . U drugoj referentnoj mješavini T450 gustoća je smanjena na  $1810 \text{ kg/m}^3$ . U mješavini LWSCC550, gustoća B550 je smanjena na  $1845 \text{ kg/m}^3$  i  $1775 \text{ kg/m}^3$  kod dodatka kokosovih ljuski u omjeru 75 % i 100 %. U mješavini T550, gustoća laganog samozbijajućeg betona je smanjena do  $1825 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $1740 \text{ kg/m}^3$ . Rezultati dobiveni iz prve i druge referentne mješavine samozbijajućeg betona sa 75-postotnim udjelom kokosovih ljuski uspoređeni su s rezultatima koje su dobili drugi istraživači. Rezultati pokazuju da veći postotak kokosovih ljuski u samozbijajućem betonu ima značajan utjecaj na smanjenje gustoće betona i može dovesti do smanjivanja mase konstrukcijskih elemenata, što podrazumijeva i manje troškove izgradnje.

#### 4.1.3.3 Utjecaj visoke temperature na gubitak mase

Gubitci mase svih uzoraka koji sadrže agregat od kokosovih ljuski izračunati su s obzirom na masu kontrolne mješavine betona (bez dodatka kokosovih ljuski), a rezultati su prikazani na slikama 4.5. i 4.6. Gubitak mase nije promatran na svim uzorcima referentnih mješavina (LWSCC450 i LWSCC550) prije izlaganja uzoraka temperaturi od  $100^\circ\text{C}$ , a razlog tomu je prisutnost vode u mikroporama matrice. Smanjenje mase betonskog uzorka promatrano je na temperaturama višim od  $100^\circ\text{C}$ , što može biti povezano s činjenicom da voda isparava pri visokim temperaturama. Stopa gubitka mase se povećava znatno na temperaturi od  $200^\circ\text{C}$ , a nakon  $400^\circ\text{C}$  gubitak se smanjuje jer nema više vode u uzorcima. Usporedbom slika 4.5.a) i 4.5.b), zaključeno je da je gubitak mase u referentnoj mješavini s dodatkom silikatne prašine veći nego u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski LWSCC450. Slični rezultati su zapaženi u mješavini LWSCC550 na slikama 4.6.a) i 4.6.b). Razlog tomu je smanjenje količine  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  u drugoj referentnoj mješavini betona budući da prisutnost silikatne prašine povećava stopu sekundarne hidratacije. U istraživanju koje je proveo Sancak i suradnici, dodavanjem 10 % silikatne prašine u laganom betonu povećava se gubitak mase za razliku od običnog betona

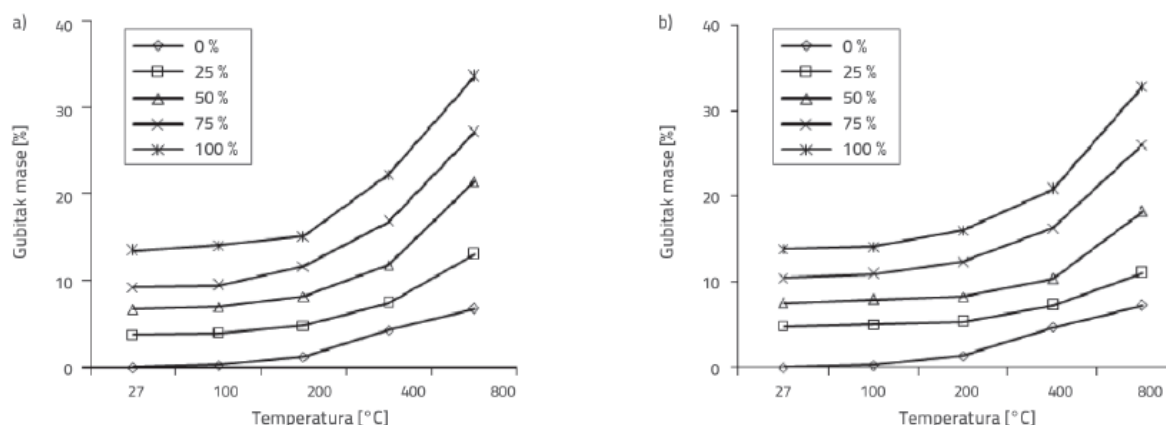


stvaranjem dodatne C-S-H veze. Dodatak silikatne prašine omogućuje smanjenje pora u betonu, što može rezultirati povećanjem tlaka u porama. Na slikama 4.5. i 4.6. vidljivo je da nema značajne promjene u stopi gubitka mase na temperaturi većoj od 100°C u betonskoj mješavini s dodatkom kokosovih ljuski (u svim omjerima). Manji gubitak mase u uzorcima LWSCC450 i LWSCC550 izmjeren je na temperaturi od 200°C, a uzrok može biti manja toplinska provodljivost miješanog betona i slabije isparavanje vode u betonu. Kapilarne pore i mikropore laganog betona su ispunjene gustom cementnom pastom s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine. Slika 4.5. i slika 4.6. prikazuju smanjenje težina laganog samozbijajućeg betona na temperaturi većoj od 200°C.



Slika 4.5. Gubitak mase mješavine LWSCC450 izložene visokim temperaturama:

- a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski (RHA);  
 b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (RHA + SF) [14]



Slika 4.6. Gubitak mase u mješavini LWSCC550 izložene visokim temperaturama:

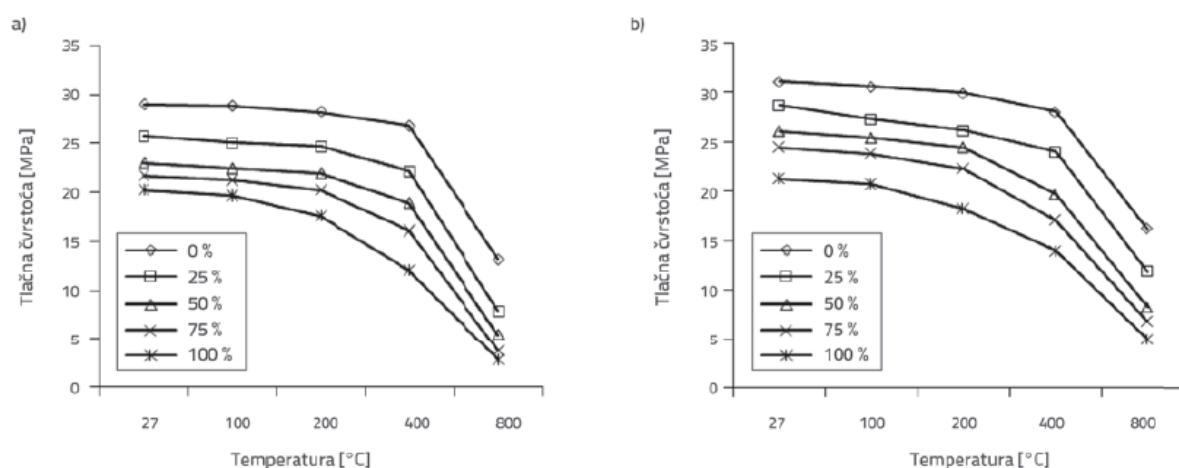
- a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski (RHA);  
 b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (RHA + SF) [14]



Razlog tomu može biti agregat od kokosovih ljuski u betonu. Različite stope gubitka mase ovise o omjeru udjela kokosovih ljuski u sastavu betona izloženog visokim temperaturama. Zbog njegove homogenosti, mikrostruktura laganog betona nalazi se pod utjecajem visokih toplinskih naprezanja koji uzorkuju povećanje stope gubitka mase na temperaturi većoj od 400 °C, u usporedbi s kontrolnom mješavinom betona.

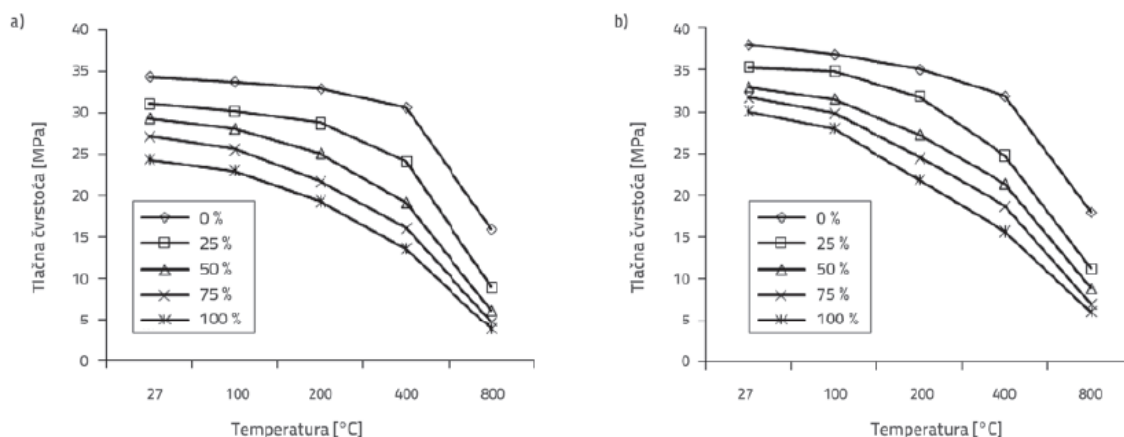
#### 4.1.3.4 Utjecaj visoke temperature na tlačnu čvrstoću betona

Promjene tlačne čvrstoće uzoraka izloženih visokim temperaturama prikazane su na slikama 4.7. i 4.8. Rezultati pokazuju da je čvrstoća s obzirom na sobnu temperaturu (27°C) bila veća u običnom betonu (bez dodatka kokosovih ljuski), a dodatak kokosovih ljuski, kao djelomična zamjena za krupni agregat smanjuje tlačnu čvrstoću u svim mješavinama. Početna čvrstoća se neznatno promijenila. Na slici 4.7. i 4.8. prikazani su i rezultati tlačne čvrstoće uzoraka koji su izloženi temperaturi od 100°C, 200°C, 400°C i 800 °C.



Slika 4.7. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 450 kg/m<sup>3</sup>):

- a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski;  
b) mješavina betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine [14]



Slika 4.8. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 550 kg/m<sup>3</sup>):

- a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski;  
b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine [14]

Rezultati ispitivanja pokazuju da svaki raspon temperature ima drugačiji utjecaj na gubitak mase. Smanjenje tlačne čvrstoće može se povezati s isparavanjem vode u mikroporama i dehidracijom uzoraka izloženih visokim temperaturama. Promjene u tlačnoj čvrstoći betona pokazuju da visoka temperatura utječe na komponente u betonu, kao i udio vlage, stupanj zagrijavanja, dehidracija te neusklađenost topline između agregata i cementne paste. Tlačna čvrstoća nakon zagrijavanja na različitim temperaturama izražava se omjerom  $fT/fi$ , gdje je  $fT$  čvrstoća nakon zagrijavanja na  $T$  °C, a  $fi$  je početna čvrstoća na sobnoj temperaturi. Tlačna čvrstoća svih uzoraka nakon zagrijavanja na 100°C, 200°C, 400°C i 800°C prikazana je u tablici 4.5. Na slikama 4.7. i 4.8., stopa smanjenja tlačne čvrstoće u kontrolnom uzorku betona manja je nego u uzorku s dodatkom kokosovih ljuski. Drugim riječima, dodavanje kokosovih ljuski betonskom sastavu, smanjuje se tlačna čvrstoća betona. U tablici 4.5. minimalni gubitak tlačne čvrstoće zabilježen je u obje kontrolne mješavine izložene temperaturi do 400°C.

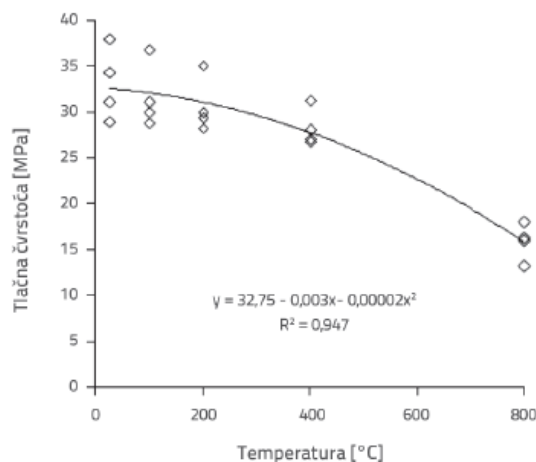
Tablica 4.5. Relativna tlačna čvrstoća [14]

Udio praha [kg/m <sup>3</sup> ]	Udio kokosovih ljuski u agregatu [%]	Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski					Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine				
		27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]	27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]
450	0	1	0,99	0,97	0,92	0,46	1,07	1,05	1,03	0,97	0,56
	25	0,89	0,87	0,85	0,76	0,27	0,99	0,94	0,90	0,83	0,41
	50	0,79	0,77	0,76	0,65	0,19	0,90	0,88	0,84	0,68	0,29
	75	0,75	0,73	0,70	0,55	0,13	0,84	0,82	0,77	0,59	0,24
	100	0,70	0,68	0,61	0,42	0,10	0,73	0,71	0,63	0,48	0,17
550	0	1	0,98	0,96	0,90	0,47	1,11	1,07	1,02	0,94	0,52
	25	0,90	0,88	0,84	0,70	0,26	1,03	1,01	0,93	0,82	0,33
	50	0,85	0,82	0,73	0,56	0,18	0,96	0,92	0,79	0,62	0,26
	75	0,79	0,74	0,63	0,47	0,14	0,92	0,87	0,71	0,55	0,21
	100	0,71	0,67	0,56	0,39	0,11	0,88	0,82	0,64	0,46	0,18

Pri temperaturi od 400°C, u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski tlačna je čvrstoća smanjena za 8 %, a u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine tlačna čvrstoća smanjena je za 3 % s obzirom na tlačnu čvrstoću mješavine LWSCC450. Smanjenje od 10 % i 6 % zabilježeno je u mješavini LWSCC550. Slični rezultati dobiveni su u mješavini betona gdje je udio kokosovih ljuski u krupnom agregatu 25 %. Na priloženim slikama se može vidjeti da vrijednosti tlačne čvrstoće naglo opadaju pri temperaturi većoj od 400°C. Stopa smanjenja čvrstoće zbog djelomične zamjene krupnog agregata s kokosovim ljuskama (u omjerima 25 %, 50 % i 75 %) povećava se na temperaturi većoj od 200 °C, a u uzorku sa 100-postotnim udjelom kokosovih ljuski u agregatu smanjuje se na temperaturi većoj od 100 °C. Slaba mikrostruktura betonske matrice zbog visokih temperatura stvara nepoželjnu konfiguraciju C-S-H veza i povećava pojavu pukotina pri visokim temperaturama. Na 400 °C, zabilježeno je 52 % smanjenje u mješavini betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i kokosovih ljuski LWSCC450, dok je smanjenje 61 % i 54 % zabilježeno u mješavini LWSCC550. Rezultati ispitivanja pokazuju da je smanjenje tlačne čvrstoće betona nastalo zbog upotrebe silikatne prašine. Prisutnost kokosovih ljuski u agregatu uzrokuje značajna oštećenja svih mješavina pri temperaturi iznad 400°C u usporedbi s referentnom mješavinom, zbog povećanog nastajanja mikropukotina i visokih toplinskih naprezanja. Pri temperaturi od 800°C sve mješavine bile su dehidrirane i njihova su svojstva oslabljena.

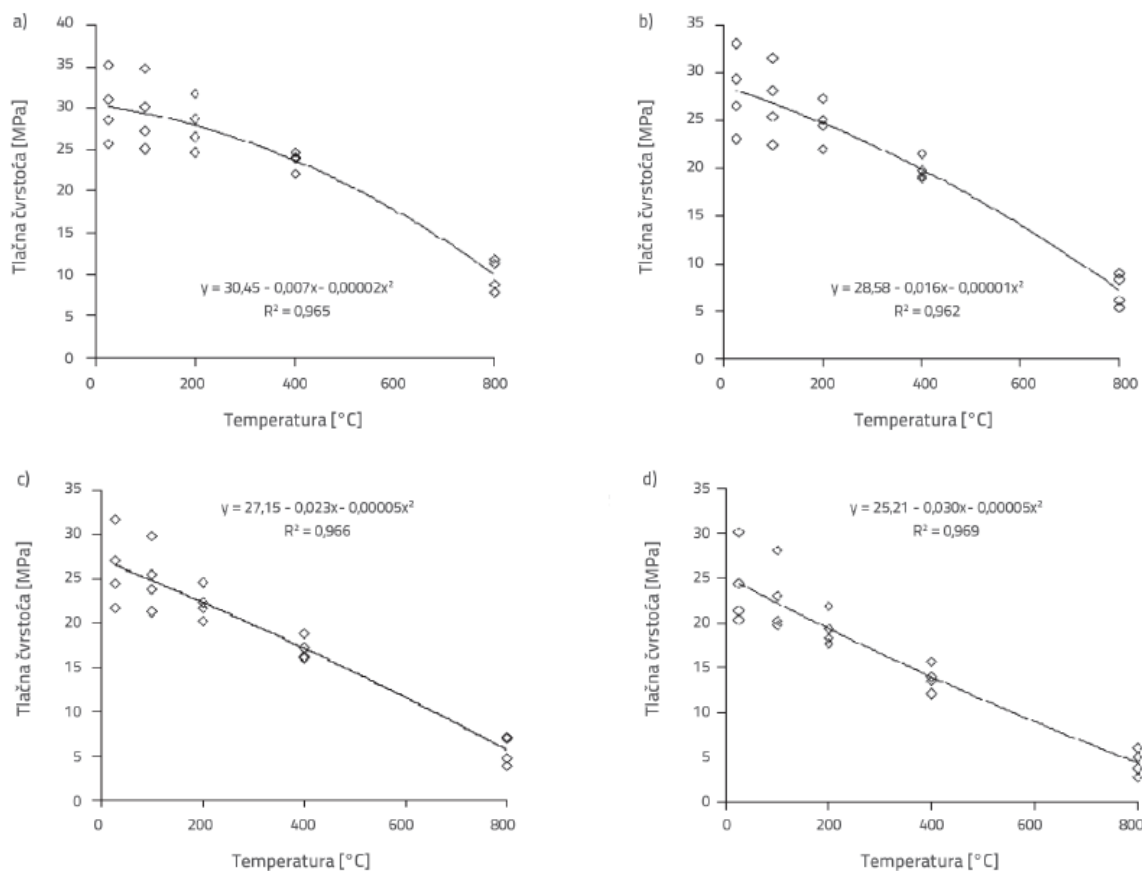
#### **4.1.3.5 Statističko modeliranje**

U radu je određena veza između tlačne čvrstoće i temperature samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski. Primijenjena je nelinearna regresijska analiza kako bi se ustanovio model između eksperimentalno dobivene tlačne čvrstoće i temperature. Tanyildizi i Coskun odredili su nelinearnu vezu između tlačne i vlačne čvrstoće i temperature, kako bi mogli predvidjeti mehanička svojstva laganog samozbijajućeg betona s dodatkom letećeg pepela. Slika 4.9. prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i temperature kontrolnog uzorka samozbijajućeg betona.



Slika 4.9. Odnos tlačne čvrstoće i visokih temperatura u kontrolnom uzorku [14]

Pomoću regresijske analize izračunat je visoki koeficijent korelacije ( $R = 0,947$ ) što ukazuje na dobro odabranu jednadžbu korelacije. Na slikama 4.10.a) i 4.10.b) prikazan je odnos tlačne čvrstoće s obzirom na temperaturu laganog samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski.



Slika 4.10. Odnos između tlačne čvrstoće i različitih temperatura u laganom samozbijajućem betonu: a) 25 %-tna zamjena u krupnom agregatu; b) 50 %-tna zamjena u krupnom agregatu; c) 75 %-tna zamjena u krupnom agregatu; d) 100 %-tna zamjena u krupnom agregatu [14]

Krivulja koja prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i temperature mijenja oblik s povećanjem udjela kokosovih ljuski od 0 % do 100 % zbog slabe mikrostrukture betonske matrice koja pokazuje da se povećanjem omjera kokosovih ljuski u krupnom agregatu smanjuje toplinska otpornost laganog samozbijajućeg betona. Mješavine s dodatkom kokosovih ljuski u svim omjerima prikazane su u tablici 4.6. te imaju visoki koeficijent korelacije (0,947 do 0,969). Taj koeficijent pokazuje da je jednadžba dobivena iz regresijske analize primijenjena za određivanje tlačne čvrstoće bez eksperimentiranja s minimalnim devijacijama koje iznose 3,1 % u mješavini sa udiom kokosovih ljuski u krupnom agregatu 100 % kokosovih ljuski, te 5,3 % za mješavinu bez dodatka kokosovih ljuski.

*Tablica 4.6. Statistički modeli tlačne čvrstoće laganog samozbijajućeg betona u odnosu na temperaturu [14]*

Broj	Zamjena u krupnom agregatu (udio kokosovih ljuski u mješavini) [%]	Jednadžba regresije	Koeficijent ( $R^2$ )
1	0	$y = 32,75 - 0,003x - 0,00002x^2$	0,947
2	25	$y = 30,45 - 0,007x - 0,00002x^2$	0,965
3	50	$y = 28,58 - 0,016x - 0,00001x^2$	0,962
4	75	$y = 27,15 - 0,023x - 0,000005x^2$	0,966
5	100	$y = 25,21 - 0,030x - 0,000005x^2$	0,969

#### 4.1.4 Zaključak

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su da gubitak mase nije zabilježen na svim uzorcima dviju referentnih betonskih mješavina (LWSCC450 i LWSCC550) na temperaturi do 100 °C. Lagani samozbijajući beton s 50-postotnim udjelom kokosovih ljuski u krupnom agregatu nije osjetljiv na temperature do 400 °C, ali daljnjim povećanjem udjela kokosa u agregatu (više od 50 %), povećava se gubitak mase. Primjenom silikatne prašine u laganom betonu (u omjeru 10 %), povećava se gubitak mase zbog smanjenja količine  $\text{Ca(OH)}_2$  u betonu, ali na to ne utječe agregat s dodatkom kokosovih ljuski. Tlačna čvrstoća mješavine betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine bila je veća nego čvrstoća mješavine s dodatkom pepela rižinih ljuski (LWSCC450 i LWSCC550), a smanjenje tlačne čvrstoće bilo je veće u uzorku prve referentne betonske mješavine nego u uzorku druge. Stopa smanjenja tlačne čvrstoće bila je veća u mješavinama sa 75 % i 100 % udjela kokosovih ljuski u agregatu izloženih na temperaturi od 200 °C, a sve mješavine koje su izložene temperaturi od 800 °C dehidrirane su i oštećene.

## **4.2 Rezidualna mehanička svojstva betona od vapnenca i granita nakon djelovanja požara (Cristina Calmeiro dos Santos, Joao Paulo Correia Rodrigues)**

U radu se promatraju rezidualna mehanička svojstva betona nakon djelovanja visokih temperatura i nakon prirodnog procesa gašenja. Poznavanje tih svojstava uvelike pomaže u promatranju rezidualne nosivosti ojačanog betona i njegove rekonstrukcije nakon djelovanja požara. U ovom radu predstavljene su procjene rezultata rezidualnih mehaničkih svojstava betona običnog sastava nakon djelovanja požara. Promatrani modeli betona u svom sastavu imaju vapnenac i granit. Rad obuhvaća utjecaj različite razine opterećenja ( $0.3f_{cd}$  i  $0.7 f_{cd}$ ), različitog načina hlađenja (hlađenje na zraku i vodenim mlaznicama) kao i mijenjanje razine maksimalne temperature izlaganja betona ( $20^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  i  $700^{\circ}\text{C}$ ). Promatrana je rezidualna tlačna čvrstoća, ispitivanje na vlak direktnom i metodom cijepanja, čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti nakon izlaganja uzoraka visokim temperaturama. Visoke temperature i nagli proces hlađenja za posljedicu imaju smanjenje rezidualnih mehaničkih svojstava. Negativni efekti su izraženiji u promatranju preostale tlačne čvrstoće nego kod ostalih mehaničkih svojstava.

### **4.2.1 Uvod**

Prema dosadašnjim istraživanjima zaključeno je da armirani beton ima povećanu vatrootpornost zbog niske toplinske provodljivosti i visokog toplinskog kapaciteta. Međutim, Abrams (1983) i Schneider (1988) u svojim radovima navode da neke građevine mogu, biti više ili manje oštećene ovisno o jačini požara. Porast temperature uzrokuje smanjenje nosivosti elemenata kao posljedica smanjenja mehaničkih svojstava betona i čelika. Degradacija mehaničkih svojstava nije ujednačena u armiranobetonskom elementu zbog različitih svojstava navedenih materijala. S druge strane, unutarnja toplinska naprezanja, koja se razvijaju u betonskoj matrici, rezultiraju pojavom pukotina i/ili ljuštenjem, što također smanjuje nosivost elementa nakon djelovanja požara.

Mehanička svojstva uzoraka betona izloženih djelovanju visokih temperatura mijenjaju se u ovisnosti o njegovom sastavu. Dva glavna faktora koji utječu na svojstva betona su brzina zagrijavanja i maksimalna postignuta temperatura. Ovi faktori dovode do promjena u kemijskom sastavu i fizikalnim strukturama betona, što rezultira pojavom mikropukotina, tipičnih za temperature iznad  $300^{\circ}\text{C}$ .

Khoury (1992) i Noumowe (1995) u svojim radovima pokazuju da veće temperature grijanja imaju za posljedicu veće smanjenje tlačne čvrstoće betona. Veća brzina grijanja dovodi do veće razlike između tlaka vodene pare i tlaka para unutar betona, što rezultira lomom i povećava rizik od ljuštenja. S druge strane, visoke temperature rezultiraju značajnim fizičkim i kemijskim promjenama u cementnoj pasti i agregatu te njihovom međusobnom odnosu. Posljedica toga je pojava mikropukotina i degradacija betona. Mehanička i termalna svojstva betona izloženog visokim temperaturama promatrana su od strane raznih autora (Hager, 2004; Harmathy, 1970; Husem, 2006), ali utjecaj požara na svojstva betona nije dovoljno istražen.

Razni autori istraživali su utjecaj opterećenja na tlačnu čvrstoću betona nakon izlaganja visokim temperaturama. Rezultati testova pokazuju da opterećenje, ukoliko nije veliko, ima pozitivan učinak na rezidualnu tlačnu čvrstoću uzoraka. Opterećeni uzorci pokazuju manje smanjenje mehaničkih svojstava od neopterećenih. Smatra se da je to posljedica zgušnjavanja cementne matrice i samim time ograničenja pucanja.

Abrams (1971) u svom radu promatra utjecaj opterećenja (25 % - 55 % tlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi) na tlačnu čvrstoću običnog betona (silikatni, karbonatni i lagani beton od pijeska) pri djelovanju visokih temperatura kao i čvrstoću nakon procesa grijanja i hlađenja. Abrams je primjetio da opterećenje ima pozitivan učinak tijekom procesa grijanja/hlađenja, gdje su opterećeni uzorci pokazali veću tlačnu čvrstoću od neopterećenih. Također je uočeno da je rezidualna tlačna čvrstoća bila manja od čvrstoće na visokim temperaturama. Betoni od karbonata i pijeska pokazuju veće čvrstoće u odnosu na beton koji u svom sastavu sadrži silicij. Khoury (1992) je također dokazao da primjena opterećenja umanjuje gubitak čvrstoće betona na visokim temperaturama kao rezultat kompresije betona, odnosno dolazi do manjih pojava pukotina.

Diederichs i suradnici (1995), Kodur i Sultan (1998) i Phan i Carino (1998) utvrdili su da betoni visoke čvrstoće počinju gubiti tlačnu čvrstoću na temperaturama nižim od običnih betona. Sve do 300°C, betoni visoke čvrstoće pokazuju gubitak skoro 30 % početne vrijednosti, dok obični beton zadržava početnu vrijednost ili čak pokazuje blagi porast čvrstoće. Pri temperaturama u intervalu od 400°C - 800°C, oba tipa betona gube većinu svoje početne vrijednosti čvrstoće, posebno na temperaturama iznad 600°C. Pri 800°C tlačna čvrstoća je nula za oba sastava betona.

Tip agregata koji se koristi u mješavini utječe na rezidualnu tlačnu čvrstoću nakon požara. Abrams (1983) je pokazao da beton od silicija ima veće smanjenje rezidualne tlačne

čvrstoće od betona u čijem sastavu je vapnenac. Međutim ta je razlika nestala kod temperature iznad 400°C.

Schneider i Nagele (1989) u svom radu iznose da je proces gašenja požara važan faktor u ponašanju rezidualne tlačne čvrstoće. Donesen je zaključak da beton hlađen vodom ima veće smanjenje tlačne čvrstoće od betona hlađenog na zraku.

Rezidualnu vlačnu čvrstoću betona u svojim radovima proučavali su Thelandersson (1971), Noumowe (1995) i Pimienta (1998). Rezultati testova ukazuju na vezu između smanjenja rezidualne tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće betona nakon procesa grijanja i hlađenja. Za temperature iznad 300°C zaključeno je, da betoni sa većom tlačnom čvrstoćom pokazuju veće smanjenje rezidualne vlačne čvrstoće. Schneider (1988) otkriva da rezidualna vlačna čvrstoća betona nakon požara ovisi o mješavini betona kao i o tipu agregata. Zaključeno je, da na temperaturi od 500°C, betoni koji u svom sastavu sadrže vapnenac imaju manju preostalu vlačnu čvrstoću od onih koji u svojoj mješavini sadrže granit.

Razne studije su pokazale da se rezidualni modul elastičnosti betona smanjuje sa temperaturom (Hager, 2004; Noumowe, 1995; Pimienta, 1999; Xiao i Konig, 2003). Zaključak zasnovan na radu Schneider i Nagele (1989) je da beton sa kvarcitom pokazuje smanjenje rezidualnog modula elastičnosti za skoro 40 % nakon izlaganja temperaturama od 300°C i 85 % nakon 600°C.

Mehanička svojstva betona izloženog visokim temperaturama dobro su poznata, ali poznavanje rezidualnih mehaničkih svojstava nakon djelovanja požara nisu dovoljno istražena, odnosno rezultati eksperimentalnih ispitivanja provedenih od strane različitih istraživačkih tijela nisu usklađeni. Istraživanja na ovu temu provedena su na Sveučilištu u Coimbra sa ciljem procjene preostalih mehaničkih svojstava betona nakon djelovanja požara. Koriste se dvije mješavine, prva sa vapnencem (CC), druga s granitom (GC) bez vlakana i s dodatkom vlakana.

#### **4.2.2 Materijali i metode**

U radu je proučavan utjecaj temperature, razine opterećenja i procesa hlađenja na rezidualna mehanička svojstva GC i CC nakon požara. Promatrana je rezidualna tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti.

Nakon što su uzorci betona podvrgnuti različitim temperaturama (300°C, 500°C i 700°C) isti su ohlađeni na vrijednost sobne temperature i testirani. Testovi su provedeni na sobnoj temperaturi (oko 20°C) da se dobiju realne vrijednosti. Uzorci su hlađeni na zraku da bi



se simuliralo prirodno gašenje požara bez utjecaja vatrogasaca, kao i vodenim mlaznicama kako bi se simuliralo gašenje vatrogascima.

U ispitivanju tlačne čvrstoće betona, tijekom procesa grijanja i hlađenja, beton je podvrgnut tlačnom opterećenju kako bi se simuliralo realno stanje opterećenja u konstrukcijama. Vrijednost opterećenja je postotak od tlačne čvrstoće betona na sobnoj temperaturi ( $0.3f_{cd}$  i  $0.7 f_{cd}$ ). Uzorci korišteni za procjenu mehaničkih svojstava zagrijavani su i hlađeni bez opterećenja prije testiranja.

#### 4.2.2.1 Sastav betona

U testu se koriste dvije mješavine, jedna koja u svom sastavu ima vapnenac (CC), a druga granit (GC). Mješavine se sastoje od Portland cement tipa II/AL 42.5 R (sa sumpornim trioksidom  $< 4 \%$  i klor  $< 0.10 \%$ ; tlačne čvrstoće 20 MPa (2 d) i 42.5 MPa (28 d)), superplastifikator (SP) SIKA (Sikament 195R) i četiri tipa agregata – sitni pijesak (A1), krupniji pijesak (A2) i drobljeni kamen (12.7 mm (B1) i 19.1 mm (B2)). Sastav mješavina betona prikazan je u tablici 4.7.

Tablica 4.7. Sastav betona od vapnenca (CC) i granita (GC) [15]

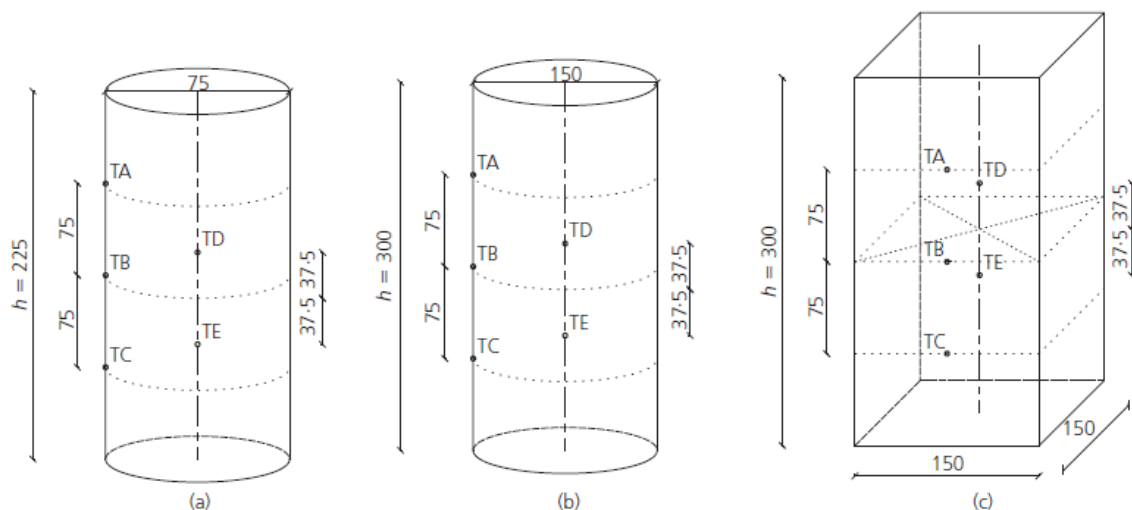
	Cement: kg/m <sup>3</sup>	Voda: dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	SP: dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	A1: kg/m <sup>3</sup>	A2: kg/m <sup>3</sup>	B1: kg/m <sup>3</sup>	B2: kg/m <sup>3</sup>	w/c faktor
CC	300	166	3-30	364	495	505	377	0-56
GC	320	165	3-20	310	511	617	459	0-52

#### 4.2.2.2 Uzorci

Uzorci za ispitivanje rezidualne tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće direktnom metodom, cilindričnog su oblika promjera baze  $d = 75 \text{ mm}$  i visine  $h = 225 \text{ mm}$  ( $d/h = 1 : 3$ ). Ove dimenzije su definirane vodeći računa o električnoj cijevi u pećnici koja će se koristiti u testovima prema preporuci RILEM TC 200-HTC (2005). Temperatura uzoraka bilježi se na 5 mjesta koristeći termoelektrični uređaj tipa K. Pozicija uređaja također je definirana RILEM TC 200-HTC (2005): tri točke na površini i dvije duž centralne osi, kao što je prikazano na slici 4.11.a).

Uzorci korišteni za ispitivanje preostale vlačne čvrstoće (metoda cijepanjem) i modula elastičnosti cilindričnog su oblika promjera baze 150 mm i visine 300 mm (slika 4.11.b)). Pri testiranju modula elastičnosti, mjerni instrumenti postavljeni su pod kutem od  $120^\circ$ , jedan u odnosu na drugi, u cilju mjerenja naprezanja. Uzorci za ispitivanje rezidualne čvrstoće na savijanje imaju oblik prizme dimenzija 150 mm x 150 mm x 600 mm (slika 4.11.c)).

Pozicija uređaja za mjerenje temperature u uzorku, određena je po istom pravilu kao i za ispitivanje rezidualne tlačne čvrstoće (RILEM TC 200-HTC (2005)). (slika 4.11.a), b) i c)). Koriste se mjerni uređaji tipa K.



Slika 4.11. Uzorci i mjesta mjerenja temperature; a) uzorak za tlačni i direktni vlačni test; b) uzorak za vlačni test (cijepanjem) i test modula elastičnosti; c) uzorak za test na savijanje; dimenzije u mm [15]

#### 4.2.2.3 Plan ispitivanja

Uzorci su čuvani u parom zasićenoj komori (relativne vlažnosti  $RH > 98 \%$ , pri temperaturi od  $20^{\circ}\text{C}$ ) 28 dana. Nakon toga drže se u laboratoriju na temperaturi od  $18^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$  i  $RH = 40 \% - 50 \%$ . Uzorci su ispitivani pri minimalnoj starosti od 3 mjeseca.

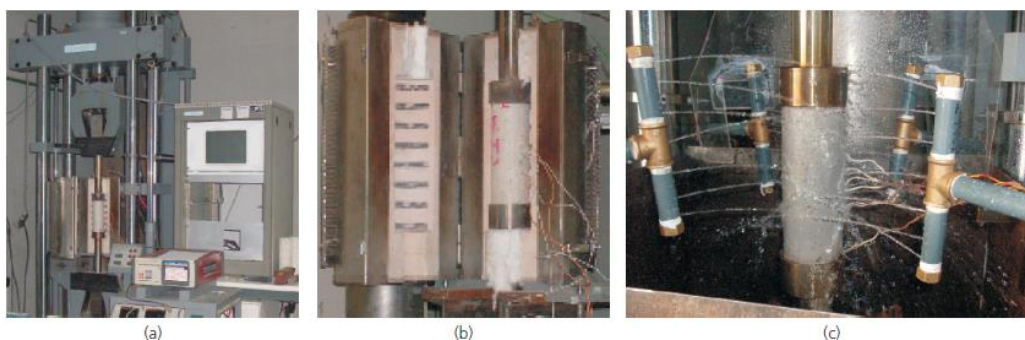
Plan ispitivanja prikazan je u tablici 4.8. u kojoj su navedene karakteristike uzoraka, razina opterećenja i maksimalna temperatura kojom su uzorci podvrgnuti. Provedena su najmanje tri ispitivanja za svaku kombinaciju parametara.

Tablica 4.8. Plan ispitivanja [15]

Test	Uzorak	Dimenzije : mm	Opterećenje : kN		Temperatura: $^{\circ}\text{C}$
			CC	GC	
Tlačna čvrstoća	Cilindar	$d = 75, h = 200$	30.8	28.0	20, 300, 500, 700
	Cilindar	$d = 75, h = 200$	71.8	65.3	
Izravna vlačna čvrstoća	Cilindar	$d = 75, h = 200$	—	—	20, 300, 500, 700
Vlačna čvrstoća (cijepanjem)	Cilindar	$d = 150, h = 300$	—	—	20, 300, 500, 700
Čvrstoća na savijanje	Prizma	$b = 150, h = 600$	—	—	20, 300, 500, 700
Modul elastičnosti	Cilindar	$d = 150, h = 300$	—	—	20, 300, 500, 700

### 4.2.3 Ispitivanja tlačne čvrstoće

U eksperimentalnom testu ispitivanja rezidualne tlačne čvrstoće korištena je standardna preša kapaciteta 600 kN s električnom cijevi u koju se stavljaju uzorci na zagrijavanje (slika 4.12.a)). Pećnica ima unutarnje dimenzije  $d = 125 \text{ mm}$  i  $h = 300 \text{ mm}$ , te postiže maksimalnu radnu temperaturu od  $1200^\circ\text{C}$ . Dva su načina hlađenja provedena u testu, jedan otvaranjem vrata peći i hlađenjem uzoraka na zraku (slika 4.12.b)), a drugi prskanjem uzoraka vodom (slika 4.12.c)). Pri hlađenju vodom protok iznosi oko  $3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  i tlak  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ .



*Slika 4.12. Testiranje tlačne čvrstoće: a) testni uređaji; b) hlađenje na zraku; c) hlađenje vodenim mlaznicama [15]*

Proces zagrijavanja u skladu je sa preporukama RILEM TC 200-HTC (2005). Uzorci su prvo izloženi opterećenju ( $0.3 f_{cd}$  ili  $0.7 f_{cd}$ ), a zatim je temperatura povećana brzinom od  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ , dok se ne postigne željena temperatura od  $300^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$  i  $700^\circ\text{C}$ . U nekim slučajevima, uzorci su pukli tijekom procesa grijanja prije nego se postigla ciljana temperatura. U takvom slučaju, sljedeći uzorci iz te serije grijani su na prethodnu temperaturu (npr. ako uzorci puknu prije dosezanja  $700^\circ\text{C}$ , novi uzorci će se testirati na  $600^\circ\text{C}$ ). Isto tako ako uzorci ne puknu na  $700^\circ$ , testovi su također provedeni pri temperaturi od  $900^\circ\text{C}$ . Početna vrijednost opterećenja je konstantna tijekom cijelog procesa grijanja/hlađenja.

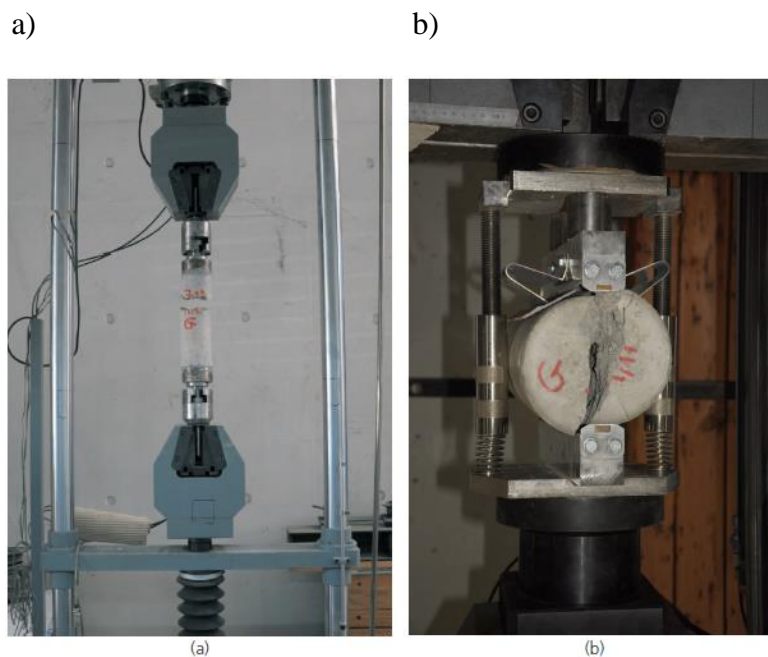
Smatra se da je temperatura uzoraka postignuta kada je prosječna temperatura (zabilježena na tri površinska termoelementa na uzorku) usklađena sa temperaturom pećnice. Maksimalne aksijalne temperaturne razlike između termoelemenata ne smiju prijeći  $1^\circ\text{C}$  na temperaturi od  $20^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$  na  $100^\circ\text{C}$  i  $20^\circ\text{C}$  na  $700^\circ\text{C}$ . Uzorci se dalje zadržavaju na toj temperaturi 1 sat, po preporukama RILEM TC 200-HTC (2005). Nakon toga uzorci su hlađeni (na zraku ili vodenim mlaznicama) da se dovedu na sobnu temperaturu od  $20^\circ\text{C}$  nakon čega su podvrgnuti tlačnom ispitivanju. Opterećenje se povećava brzinom od  $0.25 \text{ kN/s}$  dok uzorak ne pukne.

#### 4.2.4 Ispitivanja vlačne čvrstoće

Preostala vlačna čvrstoća ispitivana je izravnom metodom i metodom cijepanja kako je prikazano na slici 4.13. Peć za zagrijavanje uzoraka, kao i proces grijanja/hlađenja uzoraka jednak je kao i za ispitivanje tlačne čvrstoće, ali uzorci nisu izloženi opterećenju tijekom procesa grijanja/hlađenja. Za metodu cijepanja korištena je peć prizmatičnog oblika i unutarnjih dimenzija 135 mm x 140 mm x 250 mm i maksimalne radne temperature od 1200°C. Kao i u ispitivanju tlačne čvrstoće, neki uzorci hlađeni su na zraku dok su drugi hlađeni vodenim mlaznicama. Uzorci su ispitivani odmah nakon procesa grijanja i hlađenja. Vrijeme između prvog i zadnjeg testa svake serije je skoro 1 tjedan, a tijekom tog vremena, uzorci na kojima će se tek provoditi ispitivanja ostavljeni su na temperaturi i vlažnosti koja je u laboratoriju.

Pri izravnom vlačnom ispitivanju, uzorci su opterećeni pod direktnim vlačnim opterećenjem u kidalici sa maksimalnim kapacitetom opterećenja od 200 kN. Opterećenje se povećava brzinom od 0.25 kN/s do puknuća uzorka. Specijalni set čeličnih šipki dopušta slobodnu rotaciju na krajevima uzoraka (slika 4.13.a)).

Ispitivanje je provedeno u skladu sa EN 12390-6 (CEN,2003) (Brazilski test ili metoda cijepanja). Test je proveden prema standardu sa vlačno/tlačnim uređajem kapaciteta 600 kN (slika 4.13.b)).



Slika 4.13. Testiranje vlačne čvrstoće: a) izravna metoda; b) metoda cijepanja [15]

#### 4.2.5 Ispitivanja rezidualne čvrstoće na savijanje

Procesi grijanja/hlađenja i uređaj za ispitivanje jednaki su kao i za određivanje rezidualne vlačne čvrstoće cijepanjem. Uzorci su podvrgnuti ispitivanju na savijanje, u uređaju za vlačno/tlačno ispitivanje snage 600 kN. Opterećenje se povećava brzinom od 0.05 Mpa/s prije nego dođe do puknuća uzorka. Test se provodi u skladu sa EN 12390-5 (CEN,2009) (slika 4.14.a)).

#### 4.2.6 Ispitivanja rezidualnog modula elastičnosti

Procesi grijanja/hlađenja i uređaj koji se koristi jednak je kao i za prethodne testove. Rezidualni modul elastičnosti određuje se po preporuci RILEM TC 129-MHT (2004). Uzorci su podvrgnuti cikličkom opterećenju u uređaju za tlačno/vlačna ispitivanja snage 600 kN. Opterećenje ima vrijednost od 0.5 Mpa i  $f_c/3$ . Za određivanje modula elastičnosti koristio se specijalni set prstenova. Mjerači koji su vezani na površini uzoraka mjere naprezanja za posredno određivanje modula elastičnosti (slika 4.14.b)).

a)



b)



Slika 4.14. a) Uređaj za ispitivanje čvrstoće na savijanje; b) Uređaj za mjerenje modula elastičnosti [15]

## 4.2.7 Rezultati

### 4.2.7.1 Rezidualna tlačna čvrstoća

Rezultati opsežne analize CC i GC prikazani su u tablici 4.9. i tablici 4.10.

*Tablica 4.9. Rezidualna tlačna čvrstoća CC; TS-puknuće uzorka tijekom stabilizacije temperature; STS-puknuće uzorka na početku stabilizacije temperature; H-puknuće uzorka tijekom procesa grijanja; C-puknuće uzorka tijekom procesa hlađenja [15]*

Razina hlađenja/opterećenje	Temperatura: °C	$f_c$ or $f_{cr}$ : MPa	$\bar{f}_c$ or $\bar{f}_{cr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{cr}/\bar{f}_c$
Hlađenje na zraku 0.3 $f_{cd}$	20	36.67 38.86 37.71	37.75	1.10	1.00
	300	33.88 32.93 29.33	32.05	2.40	0.85
	500	20.16 21.34 21.30	20.93	0.67	0.55
	700	—	TS	—	0.00
	300	32.14 31.65 32.94	32.25	0.65	0.85
	500	27.55 STS STS	27.55	—	0.73
	700	—	H	—	0.00
	300	19.30 23.60 STS	21.45	3.04	0.57
	500	11.25 11.32 STS	11.28	0.05	0.30
	700	—	C	—	0.00
	300	—	C	—	0.00
	300	—	C	—	0.00



Tablica 4.10. Rezidualna tlačna čvrstoća GC; TS-puknuće uzorka tijekom stabilizacije temperature; H-puknuće uzorka tijekom procesa grijanja [15]

Razina hlađenja/opterećenja	Temperatura °C	$f_c$ or $f_{cr}$ : MPa	$\bar{f}_c$ or $\bar{f}_{cr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{cr}/\bar{f}_c$
Hlađenje zrakom 0.3 $f_{cd}$	20	21.96 23.65 25.59	23.73	1.81	1.00
	300	26.07 20.64 27.13	24.61	3.48	1.04
	500	20.50 19.99 20.35	20.28	0.27	0.85
	700	8.97 9.21 10.67	9.62	0.92	0.41
	900	—	H	—	0.00
	300	24.32 25.59 TS	24.95	0.90	1.05
	500	—	H	—	0.00
	300	17.02 12.84 15.98	15.28	2.17	0.64
	500	9.90 10.93 12.09	10.97	1.10	0.46
	700	6.80 6.98 7.18	6.98	1.10	0.29
	900	—	H	—	0.00
	300	—	TS	—	0.00
Hlađenje vodenim mlaznicama					
0.3 $f_{cd}$	500	—	H	—	0.00
	300	17.02 12.84 15.98	15.28	2.17	0.64
0.7 $f_{cd}$	500	9.90 10.93 12.09	10.97	1.10	0.46
	700	6.80 6.98 7.18	6.98	1.10	0.29
0.7 $f_{cd}$	900	—	H	—	0.00
	300	—	TS	—	0.00

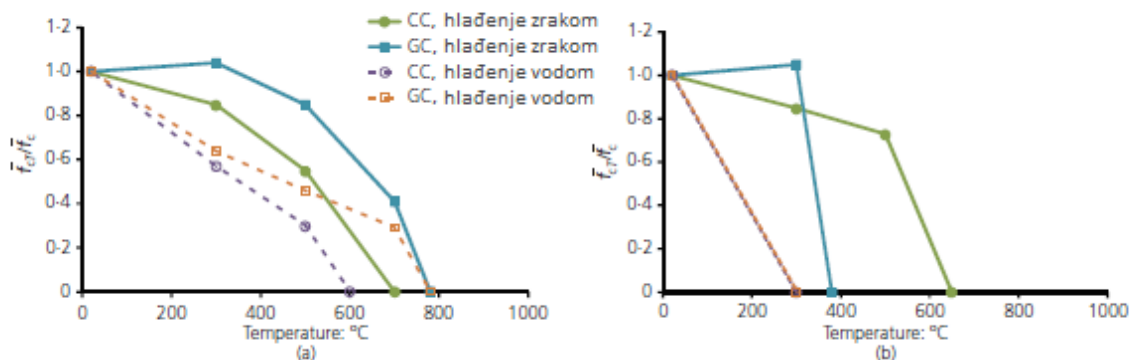
Slika 4.15.a) prikazuje promjene rezidualne tlačne čvrstoće CC i GC, za opterećenje od 0.3  $f_{cd}$  i za dva različita načina hlađenja provedena u ovom radu, uslijed različite temperature okoline koja se prikazuje kao funkcija maksimalne temperature kojoj je beton izložen. Slika prikazuje redukcije u rezidualnoj tlačnoj čvrstoći s povećanjem temperature, za oba betona. Nadalje, za oba tipa betona provedeno je hlađenje, te su uočena veća smanjenja kod CC nego GC. Hlađenje vodenim mlaznicama dovodi do većih redukcija čvrstoće u intervalu temperature od 200°C - 800°C. Vrijednosti rezidualne tlačne čvrstoće GC hlađenog vodom kao i onog hlađenog na zraku su nula za temperature koje dosežu 800°C.

Rezidualna tlačna čvrstoća uzoraka CC i GC koji su izloženi razini opterećenja 0.7 $f_{cd}$  i hlađeni na oba navedena načina prikazana je na slici 4.15.b). U slučaju hlađenja na zraku, za temperature do 300°C, GC pokazuje veće vrijednosti rezidualne tlačne čvrstoće od CC. Međutim, za temperature veće od navedene to nije slučaj: GC pokazuje znatno smanjenje u rezidualnoj tlačnoj čvrstoći, do skoro vrijednosti nula za temperaturu od 400°C, dok na istoj

temperaturi CC pokazuje skoro 80 % vrijednosti tlačne čvrstoće izmjerene prije zagrijavanja na sobnoj temperaturi.

Usporedba slike 4.15.a) i slike 4.15.b) pokazuje da opterećenje više utječe na GC nego na CC. Bolje ponašanje GC-a u usporedbi sa CC-om prestaje pod djelovanjem veće vrijednosti opterećenja. Za GC koji je hlađen na zraku i na kojega djeluje opterećenje  $0.3 f_{cd}$ , tlačna čvrstoća na  $400^{\circ}\text{C}$  iznosi oko 95 % vrijednosti tlačne čvrstoće izmjerene prije zagrijavanja na sobnoj temperaturi, ali na istoj temperaturi za opterećenje  $0.7 f_{cd}$  tlačna čvrstoća je nula. Isto ponašanje ne vrijedi i za CC: za temperaturu od  $400^{\circ}\text{C}$  i slučaj hlađenja na zraku, tlačna čvrstoća je oko 70 % vrijednosti tlačne čvrstoće izmjerene prije zagrijavanja na sobnoj temperaturi za opterećenje  $0.3 f_{cd}$  i 80 % vrijednosti tlačne čvrstoće izmjerene prije zagrijavanja na sobnoj temperaturi za opterećenje  $0.7 f_{cd}$ . CC pokazuje vrijednost nula samo na temperaturi od  $700^{\circ}\text{C}$  i pri djelovanju opterećenja od  $0.3 f_{cd}$ , kao i na temperaturi od  $600^{\circ}\text{C}$  i pri opterećenju od  $0.7 f_{cd}$ . Isto ponašanje vidljivo je i u slučaju hlađenja vodenim mlaznicama.

Proces hlađenja, posebno vodenim mlaznicama, za opterećenje  $0.7 f_{cd}$  ima značajan utjecaj na rezidualnu tlačnu čvrstoću betona.



Slika 4.15. Rezidualna tlačna čvrstoća CC i GC za razinu opterećenja: a)  $0.3 f_{cd}$ ; b)  $0.7 f_{cd}$  [15]



#### 4.2.7.2 Rezidualna vlačna čvrstoća

##### 4.2.7.2.1 Izravna metoda

Tablica 4.11.a) i b) pokazuje rezidualnu vlačnu čvrstoću dobivenu izravnom metodom. Rezultati na slici 4.16. prikazuju se kao funkcije maksimalne temperature kojom su uzorci podvrgnuti.

Tablica 4.11. a) Rezidualna vlačna čvrstoća izravnom metodom CC: puknuće uzorka tijekom procesa hlađenja; b) Rezidualna vlačna čvrstoća izravnom metodom GC [15]

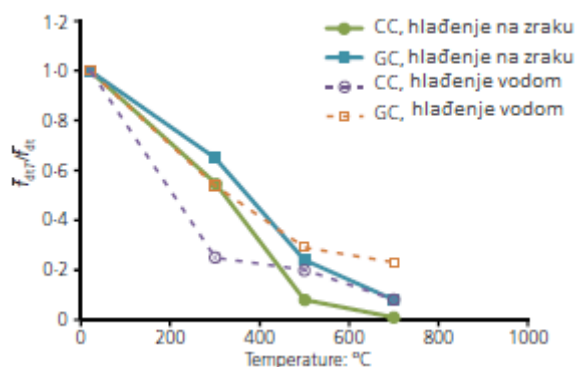
a)

Temperatura °C	$f_{dt}$ or $f_{dtr}$ : MPa	$\bar{f}_{dt}$ or $\bar{f}_{dtr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{dtr}/\bar{f}_{dt}$
20	2.29 1.91 2.64	2.28	0.36	1.00
Hlađenje na zraku				
300	1.22 1.28 1.24	1.25	0.03	0.55
500	0.17 0.17 0.19	0.18	0.02	0.08
700	0.03 0.02	0.03	0.005	0.01
Hlađenje vodenim mlaznicama				
300	0.51 0.68 0.53	0.57	0.09	0.25
500	0.35 0.60 0.44	0.46	0.13	0.20
700	0.17 0.20 0.19	0.18	0.02	0.08

b)

Temperatura °C	$f_{dt}$ or $f_{dtr}$ : MPa	$\bar{f}_{dt}$ or $\bar{f}_{dtr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{dtr}/\bar{f}_{dt}$
20	1.95 1.39 2.48	1.94	0.54	1.00
Hlađenje na zraku				
300	0.91 1.32 1.54	1.26	0.32	0.65
500	0.46 0.52 0.40	0.46	0.06	0.24
700	0.19 0.15 0.14	0.16	0.02	0.08
Hlađenje vodenim mlaznicama				
300	1.28 1.03 0.80	1.04	0.24	0.53
500	0.72 0.33 0.62	0.56	0.21	0.29
700	0.42	0.44	0.04	0.23

Slika 4.16. pokazuje da GC ima bolja svojstva od CC za oba načina hlađenja, pokazujući manje smanjenje rezidualne vlačne čvrstoće prikazane kao funkcija temperature. Gledajući oba procesa izgleda kao da nakon zagrijavanja uzoraka do 500°C, bez obzira na tip agregata, na beton manje utječe hlađenje na zraku od onog vodenim mlaznicama. Suprotno je uočeno na temperaturama iznad 500°C; hlađenje na zraku daje veće redukcije u rezidualnoj vlačnoj čvrstoći dobivenoj po izravnoj metodi za oba tipa betona. To smanjenje se može objasniti dehidracijom klinkera u cementnoj pasti, posebno kalcijevog hidroksida, i termalne nekompatibilnosti cementne paste i agregata.



Slika 4.16. Rezidualna vlačna čvrstoća CC i GC-direktna metoda [15]

#### 4.2.7.2.2 Metoda cijepanja

Rezultati rezidualne vlačne čvrstoće dobivene metodom cijepanja prikazani su u tablici 4.12.a) i b) te na slici 4.17. Za navedene tipove betona kao i za oba načina hlađenja korištena u ovom radu, ponašanje je isto. Nema značajnih razlika između hlađenja zrakom i vodenim mlaznicama. Oba procesa dovode do prilično sličnog smanjenja u rezidualnoj vlačnoj čvrstoći.

Tablica 4.12. a) Rezidualna vlačna čvrstoća metodom cijepanja CC: puknuće uzorka tijekom procesa hlađenja; b) Rezidualna vlačna čvrstoća metodom cijepanja GC [15]

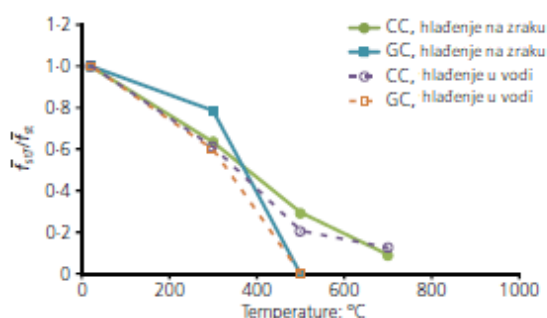
a)

b)

Temperatura °C	$f_{st}$ or $f_{stT}$ MPa	$\bar{f}_{st}$ or $\bar{f}_{stT}$ MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{stT}/\bar{f}_{st}$	Temperatura °C	$f_{st}$ or $f_{stT}$ MPa	$\bar{f}_{st}$ or $\bar{f}_{stT}$ MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{stT}/\bar{f}_{st}$
20	3.015 2.664 3.330	3.003	0.333	1.00	20	2.922 3.039 2.805	2.922	0.12	1.00
Hlađenje zrakom					Hlađenje na zraku				
300	1.922 1.819 1.967	1.902	0.076	0.63	300	2.606 2.102 2.178	2.295	0.27	0.79
500	0.807 0.977 0.874	0.886	0.085	0.30	500	—	H	—	0.00
700	0.327 0.280 0.213	0.274	0.057	0.09	700	—	H	—	—
Hlađenje vodenim mlaznicama					Hlađenje vodom				
300	1.751 1.905 1.830	1.829	0.077	0.61	300	1.572 1.826 1.841	1.746	0.15	0.60
500	0.949 0.980 0.892	0.941	0.044	0.31	500	—	H	—	0.00
700	0.355 0.415 0.325	0.365	0.046	0.12	700	—	H	—	—

Na temperaturama do 300°C, oba tipa betona pokazuju slično ponašanje. Iznad te temperature, GC pokazuje veće smanjenje u rezidualnoj vlačnoj čvrstoći od CC. Za oba načina hlađenja, rezidualna vlačna čvrstoća dobivena metodom cijepanja je nula pri temperaturi od 500°C. Međutim na istoj temperaturi, vlačna čvrstoća uzorka betona tipa CC hlađenog vodom kreće se oko 20 % vrijednosti čvrstoće na sobnoj temperaturi i 30 % uzorka hlađenog na zraku. Kod svih uzoraka GC-a koji su podvrgnuti temperaturama većim ili jednakim 500°C došlo je do pucanja tijekom procesa zagrijavanja (tablica 4.12.b)). To se objašnjava malom poroznošću GC-a u usporedbi sa CC.

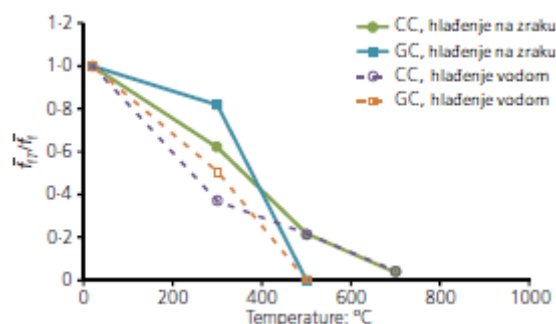
Rezultati dobiveni izravnim metodom u određenoj mjeri razlikuju se od onih dobivenih metodom cijepanja, odnosno direktnom (izravnim) metodom veće su razlike u čvrstoći s porastom temperature. Zaključak je teško grafički prikazati jer se razlika između ova dva testa nalazi i u tome što su uzorci za direktnu metodu cilindričnog oblika promjera baze 75 mm i visine 225 mm, dok su oni korišteni za metodu cijepanja cilindričnog oblika promjera 150 mm i visine 300 mm.



Slika 4.17. Rezidualna vlačna čvrstoća CC i GC- metoda cijepanja [15]

#### 4.2.7.2.3 Rezidualna čvrstoća na savijanje

Rezultati rezidualne čvrstoće CC i GC na savijanje prikazani su u tablici 4.13.a) i b), te grafički na slici 4.18. Rezultati pokazuju izraženije smanjenje rezidualne čvrstoće na savijanje pri temperaturama preko 300°C. Kao što je i ranije vidljivo, hlađenje vodenim mlaznicama ima veći utjecaj na svojstva betona, nego li hlađenje uzoraka na zraku. Zanimljivi rezultati uočeni su na temperaturama iznad 500°C u kojima CC pokazuje ista smanjenja rezidualne čvrstoće na savijanje bez obzira na način hlađenja. Na 500°C, GC pokazuje vrijednost nula, dok CC zadržava oko 20 % svoje početne čvrstoće izmjerene na sobnoj temperaturi.



Slika 4.18. Rezidualna čvrstoća na savijanje CC i GC

Tablica 4.13. a) Rezidualna čvrstoća na savijanje CC; b) Rezidualna čvrstoća na savijanje GC: H- puknuće uzorka tijekom procesa grijanja [15]

a)					b)				
Temperature: °C	$f_t$ or $f_{tr}$ : MPa	$\bar{f}_t$ or $\bar{f}_{tr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{tr}/\bar{f}_t$	Temperature: °C	$f_t$ or $f_{tr}$ : MPa	$\bar{f}_t$ or $\bar{f}_{tr}$ : MPa	$\sigma$	$\bar{f}_{tr}/\bar{f}_t$
20	3-914 6-566 5-160	5-213	1-32	1-00	20	5-388 5-370 4-632	5-130	0-43	1-00
Hlađenje na zraku					Hlađenje na zraku				
300	3-076 3-394 3-226	3-232	0-16	0-62	300	4-100 4-298 5-388	4-199	0-14	0-82
500	0-994 1-292 1-120	1-135	0-15	0-22	500	—	H	—	0-00
700	0-198 0-180 0-180	0-186	0-01	0-04	700	—	H	—	—
Hlađenje vodom					Hlađenje vodom				
300	2-060 2-256 1-436	1-917	0-43	0-37	300	2-844 2-814 2-130	2-596	0-40	0-51
500	1-210 0-964 1-162	1-112	0-13	0-21	500	—	H	—	0-00
700	0-240 0-276 0-150	0-222	0-06	0-04	700	—	H	—	—

### 4.2.7.3 Rezidualni modul elastičnosti

Tablica 4.14.a) i b) i slika 4.19. prikazuju rezultate rezidualnog modula elastičnosti za testirane betone. Modul elastičnosti smanjuje se s porastom temperature, pokazujući vrijednost nula na 500°C za GC i oko 10 % početne vrijednosti za CC. Betoni pokazuju isto ponašanje na temperaturama do 400°C za oba procesa hlađenja. Međutim, iznad 400°C, utjecaj zagrijavanja veći je kod GC, nego li je kod CC. Rezultati pokazuju da proces hlađenja nema veliki utjecaj na modul elastičnosti jer su dobivene vrijednosti hlađenjem na zraku iste kao i hlađenjem vodenim mlaznicama.

Tablica 4.14. a) Rezidualni modul elastičnosti CC; b) Rezidualni modul elastičnosti GC:

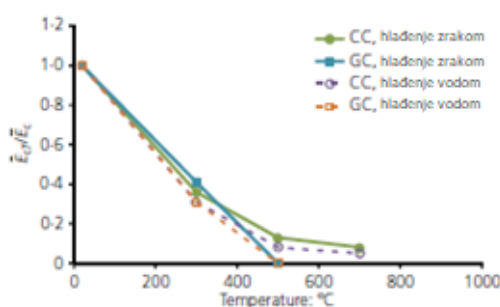
*H- puknuće uzorka tijekom procesa grijanja [15]*

a)

Temperature: °C	$E_c$ : GPa	$E_{cr}/E_c$
20	55.91	1.00
Hlađenje na zraku		
300	20.13	0.36
500	7.53	0.13
700	4.26	0.08
Hlađenje vodenim mlaznicama		
300	17.10	0.31
500	4.55	0.08
700	3.05	0.05

b)

Temperature: °C	$E_c$ : GPa	$E_{cr}/E_c$
20	53.17	1.00
Hlađenje na zraku		
300	21.63	0.41
500	H	0.00
700	H	—
Hlađenje vodenim mlaznicama		
300	16.59	0.37
500	H	0.00
700	H	—



Slika 4.19. Rezidualni modul elastičnosti CC i GC [15]

#### 4.2.8 Zaključak

U radu se pokazuju rezultati istraživanja rezidualnih mehaničkih svojstava (rezidualna tlačna i vlačna (izravna metoda i metoda cijepanja) čvrstoća i modul elastičnosti) običnog betona koji u svom sastavu ima vapnenac (CC) i betona od granita (GC) nakon izlaganja visokim temperaturama. Uzorci su testirani na dvije razine opterećenja ( $0.3 f_{cd}$  i  $0.7 f_{cd}$ ) i dva načina hlađenja (hlađenje vodenim mlaznicama i na zraku). Iz rada je zaključeno:

- a) Proces hlađenja utječe na smanjenje rezidualne tlačne čvrstoće betona. Za betone hlađene vodenim mlaznicama, i pri opterećenju  $0.3 f_{cd}$ , CC pokazuje veće smanjenje čvrstoće od GC. Za razinu opterećenja od  $0.7 f_{cd}$ , oba betona pokazuju velika smanjenja u rezidualnoj tlačnoj čvrstoći s povećanjem temperature.
- b) Utjecaj opterećenja pozitivno djeluje na rezidualnu tlačnu čvrstoću betona za temperature do malo iznad  $300^{\circ}\text{C}$  koji su hlađeni na zraku, jer utjecaj opterećenja ograničava pojavu pukotina u betonu. Rezultati također pokazuju, što je opterećenje veće, veći je utjecaj procesa hlađenja (posebno hlađenja vodenim mlaznicama) na smanjenje rezidualne tlačne čvrstoće.
- c) Rezidualna vlačna čvrstoća betona također se smanjuje sa porastom temperature, ali proces hlađenja ima manji utjecaj nego li je to slučaj kod tlačne čvrstoće. Smanjenje kod uzoraka CC bilo je jednako za obe provedene metode (izravna i cijepanjem) i za oba načina hlađenja uzoraka. Isto nije slučaj za GC, čije je smanjenje nakon  $300^{\circ}\text{C}$  bilo izraženije kod metode cijepanja.
- d) Rezidualna čvrstoća na savijanje opada kao funkcija porasta temperature, posebno kod GC-a. Hlađenje vodenim mlaznicama ima veći utjecaj na zadano svojstvo od hlađenja na zraku.
- e) Rezidualni modul elastičnosti pokazuje smanjenje vrijednosti kada je beton izložen visokim temperaturama, neovisno o tipu agregata ili procesu hlađenja.

### **4.3 Utjecaj visoke temperature i vremena zagrijavanja na rezidualnu čvrstoću normalnog betona i betona visoke čvrstoće ( B.Toumi, M.Resheidat, Z.Guemmedi, H. Chabil)**

U ovome radu predstavljeni su rezultati istraživanja utjecaja visokih temperatura na betonske uzorke. Da bi se proučili efekti visoke temperature i vremena zagrijavanja na rezidualnu čvrstoću betona, normalni beton i beton visoke čvrstoće podvrgnuti su tlačnom i indirektnom vlačnom testu. Također, promatran je učinak dodavanja polipropilena u sastav betona visoke čvrstoće. Uzorci betona oblika kocke izloženi su visokim temperaturama i to na 100°C, 300°C, 500°C i 700°C u vremenskom trajanju od 3, 6 i 9 sati, te nakon toga hlađeni na zraku. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje grijanih uzoraka uspoređivane su sa čvrstoćama negrijanih uzoraka. Eksperimentalni rezultati pokazuju da čvrstoća betona opada s povećanjem temperature i vremena zagrijavanja. Razred betona utječe na rezidualnu tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje; smanjenje čvrstoće je veće u normalnom betonu nego u betonu visoke čvrstoće oznake HPC, taj efekt je vidljiviji što se vrijeme zagrijavanja povećava. Polipropilenska vlakna imaju povoljan utjecaj na rezidualnu čvrstoću HPC-a.

#### **4.3.1 Uvod**

Betonske konstrukcije imaju jako dobro ponašanje na visokim temperaturama. Primjer toga su betonski temelji za pokretanje raketa, beton u nuklearnim elektranama, odnosno beton izložen požaru u tunelima. Takvih slučajeva je bilo nekoliko u prošlosti. Jedan od njih dogodio se u tunelu između Lakhadaria i Ammal u veljači, 2008. godine. Nakon sudara dvaju vlakova, zapaljeno je oko 750 m<sup>3</sup> plinskog ulja. Temperatura je dosegala 1200°C. Intervencija je bila nemoguća i požar je trajao 48 sati. Nastale su ogromne štete i tunel je i danas zatvoren.

U različitim aspektima proučavana je čvrstoća normalnog betona i betona visoke čvrstoće. Eksperimentalni parametri koji se razlikuju su maksimalna temperatura, brzina grijanja, tip agregata i različite vezivne tvari. Uglavnom se koriste tri metode ispitivanja, test s naprežanjem, test bez naprežanja i test rezidualne čvrstoće bez naprežanja. Najviše pozornosti posvećuje se testu bez naprežanja. Prikazuje se najniža granica rezidualne čvrstoće. Kada je beton izložen djelovanju porasta temperature, događaju se fizičke promjene (npr. evaporacija, kondenzacija, adsorpcija vode i vlage, difuzija pare, provođenje topline i advekcija, faza ekspanzije), kemijske (npr. dehidracija, termo-kemijska oštećenja) i mehaničke (npr. termo-mehanička oštećenja, pucanje, puzanje, izgaranje) koje rezultiraju pogoršanjem svojstava

betona. U laboratorijskim i realnim požarnim uvjetima uočeno je izgaranje betona izloženo vatri. Dodavanje polipropilenskih vlakana u betonsku mješavinu smanjuje spaljivanje HSC-a pod djelovanjem požara i povećava izdržljivost betona na požar. Zbog toga se djelovanje visokih temperatura općenito manifestira u obliku površinskog pucanja. Omer (2007) je primjetio da su površinske pukotine postale vidljive kada je temperatura dosegla 600°C. Pukotine su bile izražene na 800°C i znatno su se povećale pri temperaturi od 1000°C. Promjene koje su stvarale visoke temperature postajale su vidljive kada je temperatura prešla 500°C. Većina tih promjena na toj temperaturi smatra se da je nepovratna. Prema Chanu i suradnicima (1999), raspon između 400°C i 800°C smatra se kritičnim za gubitak čvrstoće. Savva i suradnici (2005) primjetili su da su na temperaturi iznad 600°C su svi testirani betoni pretrpjeli pogoršanje i ostao je samo mali dio početne čvrstoće, u rasponu od 7 % do 25 % za sve smjese.

Kako bi se smanjilo eksplozivno zgušnjavanje betona visoke čvrstoće na visokim temperaturama, Nishida i suradnici (1995) i Atkinson (2004) otkrili su da primjena polipropilenskih vlakana može znatno smanjiti navedene negativne efekte uzoraka HPC na visokim temperaturama. Polipropilenska vlakna stvaraju kanale kroz koje se tlak vodene pare stvoren unutar HPC-a oslobađa. Oslobađanje tlaka pare je povoljno jer ne dolazi do eksplozivnog pucanja unutar strukture betona. Poon i suradnici (2004) zaključili su da dodavanje PP vlakana rezultira bržem gubitku tlačne čvrstoće nakon izlaganja temperaturama preko 800°C. Međutim, također su otkrili da se preostala tlačna čvrstoća HPC-a s običnim Portlandovim cementom koji sadrži PP vlakna povećava za 4,6 % nakon izlaganja na temperaturi od 600°C, dok ima smanjenje 3,2 % nakon izlaganja temperaturi od 800°C, uspoređujući ga s HPC-om bez PP vlakana.

Jianzhuang i suradnici (2006) zaključili su da osim masenog gubitka, dodavanje PP vlakana nema negativan utjecaj na tlačnu i savojnu čvrstoću nakon izlaganja uzoraka visokim temperaturama. Međutim, utjecaj povećanja sadržaja PP vlakana još uvijek nije dovoljno istražen. To iziskuje daljnju istragu.

Prethodne eksperimentalne studije su se uglavnom usredotočile na smanjenje čvrstoće. Samo nekoliko studija (Mohamedbhai, 1986; Resheidat i suradnici, 1999) promatra kombinirani utjecaj visoke temperature i vremena zagrijavanja. Ova tema iziskuje dodatna istraživanja koja će biti korisna u inženjerskoj praksi. Također dobra studija bi pomogla inženjerima u obnovi požarom zahvaćenih konstrukcija, sa gledišta funkcionalnosti.



### 4.3.2 Eksperimentalna studija

#### 4.3.2.1 Materijali

Agregat je od drobljenog vapnenca. Njegova svojstva su prikazana u tablici 4.15.a) i b). Upotrebljen je Portland cement 42.5 MPa, dobiven u Jordanu kao CEM I. Kemijski dodaci i fizička svojstva betona prikazana su u tablici 4.16.a) i b). Korištena je silikatna prašina (ASTM C-494 F) i polipropilenska vlakna (PP vlakna). Fizička svojstva PP vlakana dana su u tablici 4.17.

Tablica 4.15. a) Prolasci na situ agregata; b) fizička svojstva agregata [16]

a)

Veličina zrna <b>mm</b>	Otvor sita <b>(mm)</b>						
	0.25	0.5	1	2	4	8	12.5
0 – 4	29	41	69	82	97	100	100
4 – 12.5	0	0	0	1	2	46	99

b)

Veličina zrna <b>mm</b>	Specifična težina	Jedinična težina <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	Razina apsorpcije vode <b>24 h (%)</b>
0 – 4	2.46	1705	1.62
4 – 12.5	2.75	1617	1.05

Tablica 4.16. a) Fizičke karakteristike cementa; b) karakteristike cementa [16]

a)

Rezultati ispitivanja	
Podešeno početno vrijeme (minute)	145
Vrijeme završetka (minute)	260
Specifična površina (cm <sup>2</sup> /g)	2810
Specifična težina	3150
Ostatak na 200 μm (%)	1.00

b)

Rezultati fizičkih svojstava		Kemijski sastav %	
Početno vrijeme	2:25	CaO	58.80
Završno vrijeme	4:20	SiO <sub>2</sub>	21.70
Spec.površina , cm <sup>2</sup> /gr	2810	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.10
Specifična težina	3.15	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60
Ostatak na 200 μm,%	1.0	MgO	3.60
Sastav %		SO <sub>3</sub>	3.00
C <sub>3</sub> S	61.19	K <sub>2</sub> O	0.72
C <sub>2</sub> S	11.09	NaO	0.44
C <sub>3</sub> A	7.92		
C <sub>4</sub> AF	10.39	LOI*	1.50

Tablica 4.17. Fizička i mehanička svojstva vlakana [16]

Promjer , μm	50
Duljina , mm	20
Mjerilo slike	1000
Relativna gustoća , g/cm <sup>3</sup>	0.91
Temperatura pečenja , °C	600
Temperatura taljenja , °C	165

#### 4.3.2.2 Sastav mješavine

Isti je granulometrijski sastav korišten u sve tri promatrane mješavine. U ovom radu promatra se beton normalne čvrstoće (NSC), beton visoke čvrstoće (HSC) i beton visoke čvrstoće koji sadrži polipropilenska vlakna (HSC-PP). U sastavu betona normalne čvrstoće vodocementni faktor je 0,45, a kod betona visoke čvrstoće je 0,30. U proizvodnji betona visoke čvrstoće dodana je silikatna prašina (10 % težinskog udjela cementa) i primjenjen je superplastifikator. Detaljni sastav navedenih betona dan je u tablici 4.18.

Tablica 4.18. Sastav betona u m<sup>3</sup> [16]

Sastav	NSC	HSC	HSC-PP
Cement, kg	500	500	500
Pijesak , kg	1125	1220	1220
Šljunak , kg	1470	1450	1450
Silikatna prašina kg	-	50	50
Polipropilenska vlakna, kg	-	-	1.5
Voda, litre	250	204	204
Superplastifikator	-	3 %	3 %
Voda/vezivo	0.50	0.37	0.37

#### 4.3.2.3 Postupak miješanja

Pri miješanju betona koristi se mješalica kapaciteta 80 l s definiranim nagibima. Dodatci i sitni agregat izmjereni su i stavljeni u betonsku mješalicu, prethodno navlaženi i miješani 3 minute s dodavanjem vode, te 3 minute uz dodatak cementa i silikatne prašine. Superplastifikator zatim je dobro promiješan s vodom i dodan u mikser. Vlakna se ručno raspršuju u mješavinu kako bi se postigla njihova uniformna raspodjela u betonu, te se miješaju ukupno 3 minute. Svježi beton stavljen je u čelične kalupe i zbijen na vibrirajućem stolu. Za određivanje čvrstoće korišteni su uzorci oblika kocke brida 100 mm, i greda 100 mm x 100 mm x 300 mm, koja je korištena za ispitivanje vrijednosti savojne čvrstoće. Nakon jednog dana uzorci su vađeni iz kalupa, te čuvani u vodi 20 do 28 dana, a zatim su izloženi na zraku na temperaturi od 20°C i relativnoj vlažnosti u vrijednosti od 50 %.

Nakon toga, svi uzorci su uskladišteni u vodi na temperaturi od  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  21 dan, te se vraćaju i drže na sobnoj temperaturi pri iznosu relativne vlažnosti od 65 % do vremena ispitivanja. Uzorci su stari 28 dana u vrijeme ispitivanja.

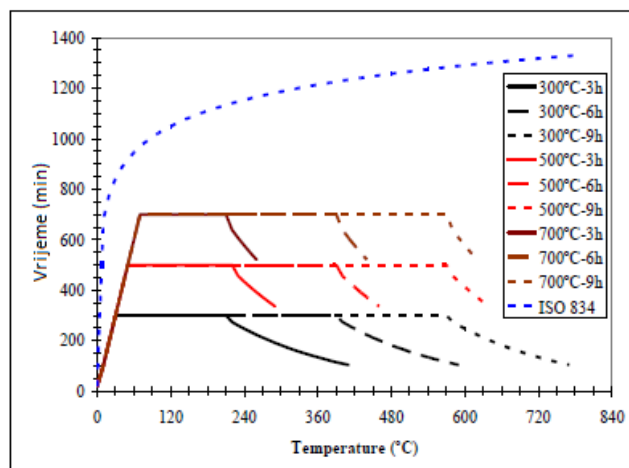
#### 4.3.2.4 Metodologija ispitivanja

Negrijani uzorci se nakon 28 dana ispituju na tlačnu i vlačnu savojnu čvrstoću. Ostali uzorci se griju u električnoj peći (Carbolite gpc, slika 4.20.) s brzinom grijanja od  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  do željene temperature. Uzorci se ispituju na tri zadane temperature:  $300^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ . Na svakoj temperaturi uzorci su održavani 3, 6 i 9 sati, tako da je temperatura u uzorku blizu temperature koja je postignuta u peći. Temperaturu uzoraka mjerimo termoelementom tipa K.



Slika 4.20. Uzorci u električnoj peći [16]

Povećanje izloženosti uzoraka visokim temperaturama uspoređeno je s standardnom krivuljom ISO 834 i prikazano na slici 4.21. Nakon svakog ciklusa zagrijavanja, uzorci su ostavljeni da se ohlade na laboratorijsku (sobnu) temperaturu tijekom 24 sata i zatim su ispitani da bi se procijenila preostala vrijednost čvrstoća. Za svako ispitivanje korištena su tri uzorka kako bi se osigurala točnost rezultata.

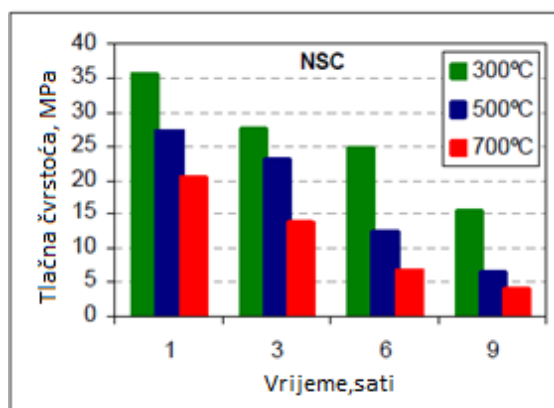


Slika 4.21. Ekserimentalna krivulja vrijeme-temperatura uspoređena s krivuljom ISO 834 [16]

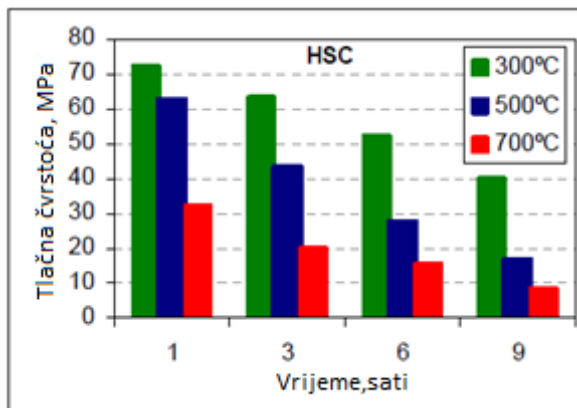
#### 4.3.2.5 Komentar rezultata

Rezidualna tlačna čvrstoća NSC, HSC i HSC-PP prikazana je na slici 4.22.a), b) i c).

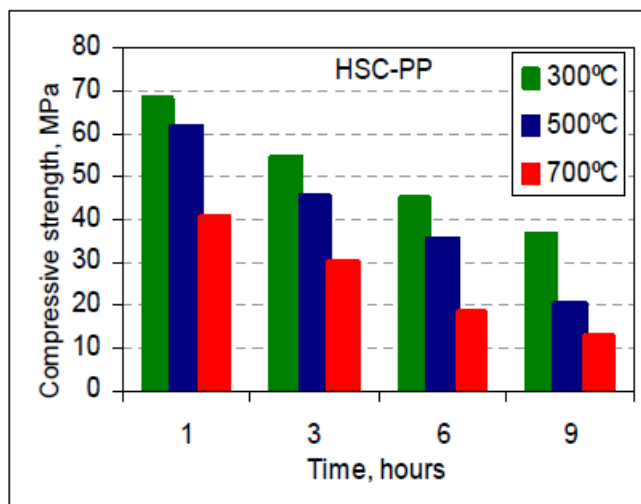
a)



b)



c)



Slika 4.22. Rezidualna tlačna čvrstoća: a) zagrijani uzorci betona-NSC; b) zagrijani uzorci betona-HSC; c) zagrijani uzorci betona-HSC-PP [16]

#### 4.3.2.6 Utjecaj temperature i vremena grijanja

Slika 4.22. pokazuje da tlačna čvrstoća pada s povećanjem temperature i vremenom grijanja. Prema ovim rezultatima, kada je temperatura dosegla 300°C i za 1 sat grijanja, došlo je do povećanja tlačne čvrstoće u iznosima 2 % za NSC, 3 % za HSC i 5 % za HSC-PP. Za isto vrijeme zagrijavanja i za temperaturu od 500°C do 700°C, došlo je do pada tlačne čvrstoće od 22 % do 42 % za NSC, 10 % do 54 % za HSC i 6 % do 38 % za HSC-PP. Ranije studije pokazuju da je povećanje uzrokovano isparavanjem slobodne vode i uklanjanje kristalizacije u cementnoj pasti (Husem, 2006). Kao što je prikazano u tablici 4.19., za vrijeme zagrijavanja od 3, 6 i 9 sati na 500°C, svi ispitani betoni pokazuju gubitak tlačne čvrstoće. Najveća vrijednost gubitka čvrstoće je 56 % za NSC (9 sati), a najmanja 10 % za HSC (3 sata). Na 700°C, najveća vrijednost je 89 % za NSC i 54 % za HSC-PP.

Tablica 4.19. Gubitak tlačne čvrstoće prikazan kao funkcija temperature i vremena grijanja

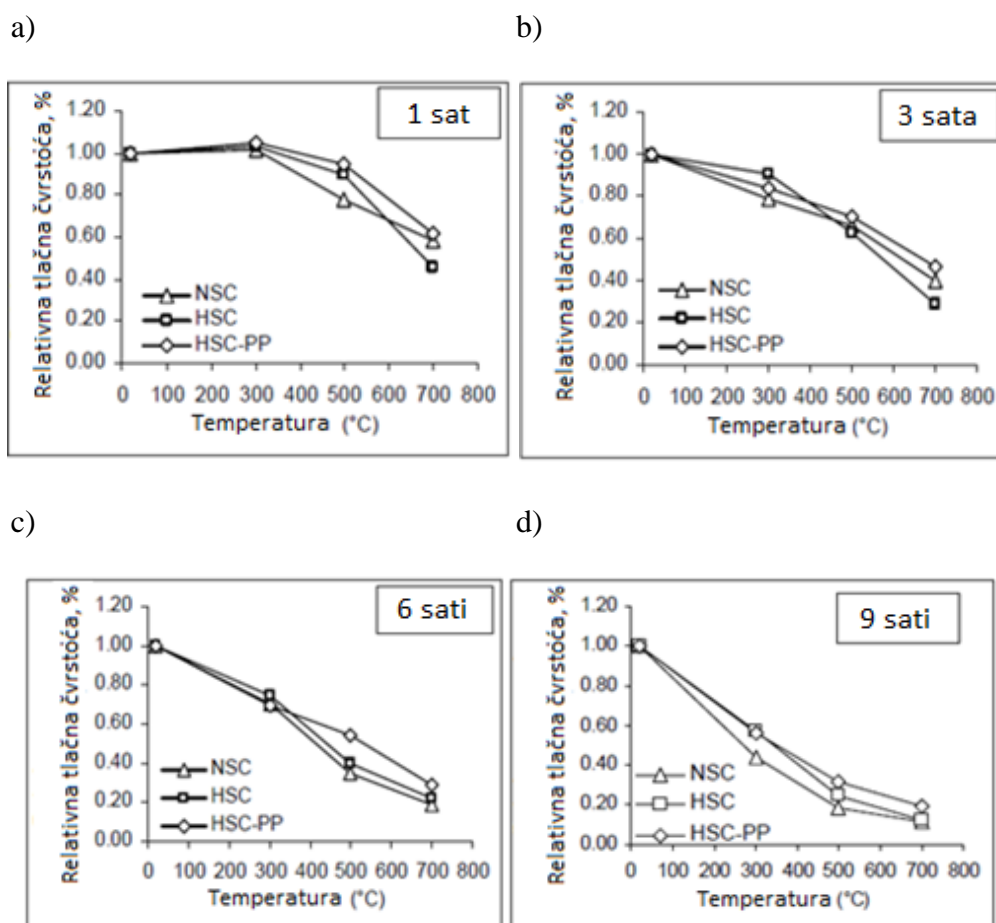
Tip betona	Vrijeme grijanja h	Temperatura grijanja °C		
		300	500	700
<b>NSC</b>	1	+0.02	-0.22	-0.42
	3	-0.21	-0.34	-0.61
	6	-0.30	-0.65	-0.81
	9	-0.56	-0.82	-0.89
<b>HSC</b>	1	+0.03	-0.10	-0.54
	3	-0.10	-0.38	-0.71
	6	-0.25	-0.60	-0.78
	9	-0.43	-0.76	-0.88
<b>HSC-PP</b>	1	+0.05	-0.06	-0.38
	3	-0.16	-0.30	-0.54
	6	-0.31	-0.46	-0.71
	9	-0.44	-0.68	-0.80
- Gubitak čvrstoće + Povećanje čvrstoće				

Gubitak tlačne čvrstoće zagrijanih uzoraka rezultat je promjena koje se javljaju u mikrostrukturi betona tijekom procesa zagrijavanja (npr. skupljanje, razgradnja, širenje, uništenje kristalne strukture betona, ...)

Prema Min i suradnicima (2004), kristalna transformacija  $\text{SiO}_2$  rezultira povećanjem volumena do 0.85 %. Dehidracija, koju slijedi hidroskopski proces  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  također dovodi do ekspanzije betona. Štoviše, ekspanzija uzrokovana porastom temperature i skupljanje uzrokovano dehidracijom cementne paste u konačnici rezultira promjenom volumena od 0,5 %.

#### 4.3.2.7 Učinci na čvrstoću

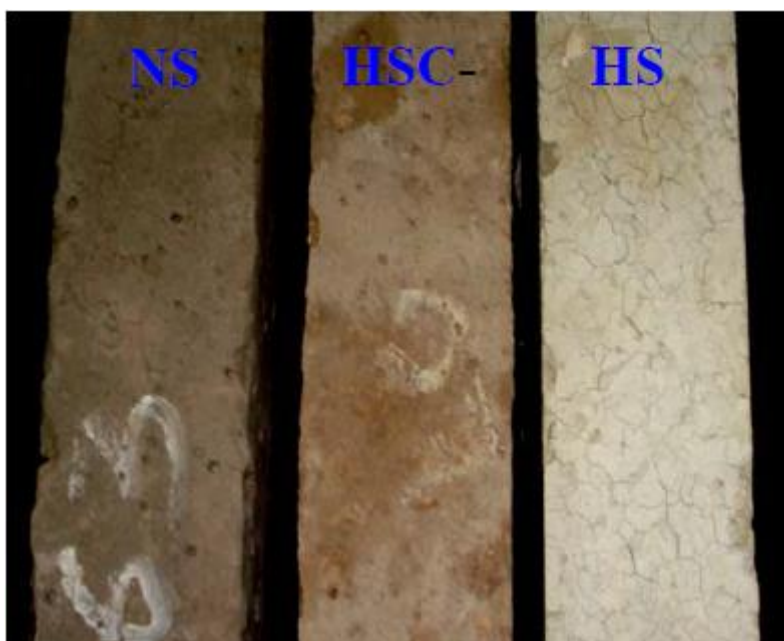
Kao što je prikazano na slici 4.23. (a, b, c, d) gubitak čvrstoće veći je kod HSC nego kod NSC za vrijeme zagrijavanja do 6 sati. Ova je razlika uočena osobito u rasponu temperature od 25°C do 300°C. Pri zagrijavanju od 9 sati, HSC je zadržao 24 % tlačne čvrstoće na 500°C i 12 % na 700°C, dok su za NSC vrijednosti 18 % na 500°C i 11 % na 700°C. Prema (Phan, 1996; Ali, 2002; Phan i suradnici, 2001), eksplozivno ljuštenje HSC pojavljuje se kada je temperatura u intervalu od 300°C do 650°C. Na taj proces utječu mnogi faktori (starost betona, sadržaj vlage, tip šljunka i pijeska, način stvrdnjavanja i brzina zagrijavanja). U ovom radu nije zabilježeno eksplozivno ljuštenje.



Slika 4.23. Rezidualna tlačna čvrstoća: a) nakon 1 sata; b) nakon 3 sata; c) nakon 6 sata; d) nakon 9 sata [16]

#### 4.3.2.8 Utjecaj vlakana od polipropilena

Rezidualna tlačna čvrstoća HSC-a ima veće smanjenje u odnosu na HSC-PP-a, uglavnom na temperaturama iznad 300°C i za sva vremena zagrijavanja. To potvrđuje da PP vlakna mogu značajno poboljšati otpornost HSC-a, te smanjiti površinsko pucanje i propadanje kako je prikazano na slici 4.24. (a, b, c). Slika 4.24. prikazuje površinsko ponašanje NSC, HSC i HSC-PP zagrijanih na 700°C tijekom 3 sata. Nakon izlaganja visokoj temperaturi, na HSC-u pojavljuju se površinske pukotine. Međutim, nekoliko pukotina se javlja i na NSC i HSC-PP. Razlog tome je oslobađanje vode pri 100°C, kada se čestice cementa povezuju i onemogućuju slobodan prolaz vodenoj pari.

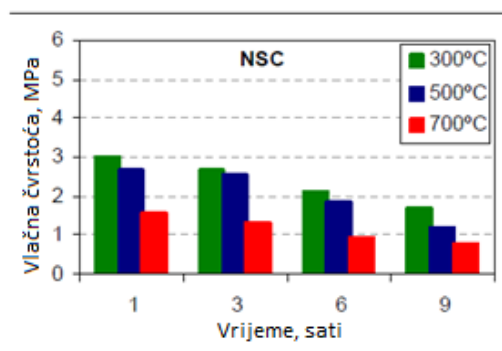


*Slika 4.24. Površinsko ponašanje NSC-a, HSC-a i HSC-PP grijanih na 700°C tijekom 3 sata [16]*

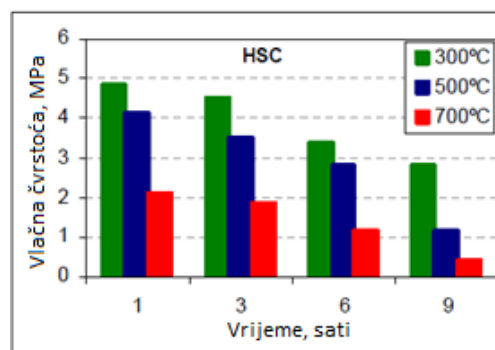
Rezidualna vlačna čvrstoća na savijanje za NSC, HSC i HSC-PP dana je slici 4.25. (a, b, c). Kao što je prikazano na slici 4.25., vidljivo je da se vlačna čvrstoća na savijanje smanjuje s povećanjem izlaganja visokim temperaturama. Nakon 9 sati na 700°C, zadržano je 22 % čvrstoće za NSC, 8 % HSC i 15 % HSC-PP. Kod HSC, gusta struktura uzorkuje toplinski pritisak koji rezultira pojavom mikropukotina (slika 4.24.) koje smanjuju korisnu površinu poprečnog presjeka. Kao posljedica toga, utjecaj pukotina je vidljiviji kod čvrstoće na savijanje nego li je to slučaj kod tlačne čvrstoće, što je također opisano u radu Min i suradnika (2004).



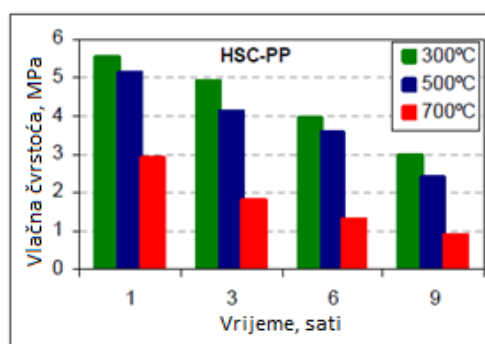
a)



b)



c)



Slika 4.25. Rezidualna čvrstoća na savijanje: a) grijanog uzorka NSC-a; b) grijanog uzorka HSC-a i c) grijanog uzorka HSC-PP [16]

Tablica 4.19. prikazuje gubitak vlačne čvrstoće na savijanje kao funkciju temperature i vremena grijanja.

Tablica 4.19. Postotak gubitka vlačne čvrstoće na savijanje u funkciji temperatura i vremena grijanja [16]

Tip betona	Vrijeme grijanja, h	Temperatura grijanja (°C)		
		300	500	700
NSC	1	-11	-21	-53
	3	-21	-25	-61
	6	-38	-45	-72
	9	-50	-64	-78
HSC	1	-8	-21	-60
	3	-14	-33	-64
	6	-35	-46	-78
	9	-47	-78	-92
HSC-PP	1	-6	-13	-51
	3	-16	-30	-69
	6	-33	-40	-78
	9	-49	-59	-85

- Gubitak čvrstoće + Povećanje čvrstoće

#### **4.3.2.9 Vlačna čvrstoća na savijanje**

Promatrajući vlačnu čvrstoću nije došlo do povećanja njene vrijednosti. To vrijedi za svo zagrijavano vrijeme kao i za sve temperature. Gubitak vlačne čvrstoće na savijanje je uglavnom rezultat pucanja, odnosno promjena koja se javljaju kod betonskih uzoraka tijekom procesa skupljanja uzrokovanih dehidracijom cementne paste. Najmanje zadržane vrijednosti čvrstoće na savijanje opažene su za HSC, a najviše za NSC i HSC-PP. Zaključak je da dodavanje polipropilenskih vlakana u HSC smanjuje gubitak vlačne čvrstoće nakon izlaganja betona visokim temperaturama.

#### **4.3.3 Zaključak**

U ovom radu provedeno je niz eksperimenata u cilju ispitivanja preostale čvrstoće uzoraka NSC, HSC i HSC-PP koji su izloženi visokim temperaturama u rasponu od 300°C do 700°C i trajanju zagrijavanja između 1 i 9 sati. Na temelju eksperimentalnih rezultata prikazanih u ovom radu, mogu se izvući zaključci:

1. Preostala čvrstoća betona smanjuje se s povećanjem vrijednosti visokih temperatura i s produljenjem vremena zagrijavanja betona. Kao posljedica toga nastaju oštećenja u betonu.
2. Povoljno je dodavanje polipropilenskih vlakana u smjesu HSC-a, jer se smanjuje gubitak vrijednosti rezidualne tlačne i vlačne čvrstoće.
3. Preostala čvrstoća na savijanje HSC-a (sa i bez polipropilenskih vlakana) kontinuirano pada sa porastom temperature.
4. Polipropilenska vlakna rastapaju se pri visokim temperaturama (npr. požar), stvarajući šupljine koje sprječavaju eksplozivno ljuštenje betona.

## **5 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA**

### **5.1 Uvod u eksperimentalni dio rada**

Cilj eksperimentalnog rada je proučiti djelovanje visokih temperatura na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Ispitivan je utjecaj naglog hlađenja uzoraka vodom neposredno nakon izlaganja visokim temperaturama. Dobiveni rezultati uspoređivani su s rezultatima, dobivenim u okviru diplomskog rada [5] na temu mehaničkih svojstava samozbijajućeg lakog betona nakon izlaganja visokim temperaturama, uzoraka istih sastava kao što su korišteni u ovom radu s tom razlikom da su hlađeni na zraku. Ispitivana su svojstva uzoraka nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C. Mjerena je tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka kroz zadane uzorke kao i masa istih. U poglavlju 6. detaljno je opisan način zagrijavanja uzoraka i održavanja na željenoj temperaturi, te ispitivanje rezidualnih mehaničkih karakteristika mješavina.

Za eksperimentalni dio rada korišteni su betonski uzorci cilindričnog oblika stari tri godine napravljeni za potrebe diplomskog rada na temu samozbijajućeg betona sa različitim dodacima [17]. Korištene su tri različite mješavine:

- SCC5 – samozbijajući beton s dodatkom filera od recikliranog betona
- SCC6 – samozbijajući beton s dodatkom silikatne prašine
- SCC7 - samozbijajući beton s dodatkom metakaolina

Rezultati ispitivanja u svježem stanju betona su preuzeti iz navedenog diplomskog rada kako bi se dobio detaljan uvid u karakteristike mješavina. Navedeni rezultati tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti (starost od 28 dana) dobiveni su na kocki, dok su se ispitivanja na požar vršila na cilindričnim uzorcima.

## 5.2 Upotrebljeni materijali

U pripravljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM I 42,5 R
- Liapor lagani agregat frakcija 0 - 2 mm i 4 - 8 mm
- Superplastifikator FTF
- Filer od recikliranog betona
- Silikatna prašina
- Metakaolin

### 5.2.1 Sastavi betonskih mješavina

Mješavine su projektirane prema CBI metodi čije je osnovno polazište projektiranja da se samozbijajući beton sastoji od tekuće ili kontinuirane faze, faze paste i čvrste faze (agregata). Prednost ove metode je što uzima u obzir porijeklo agregata (drobljenog i riječnog). Primjenjiva je za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete gradnje. Količine potrebne za 1m<sup>3</sup> betona prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Sastav betonskih mješavina za 1 m<sup>3</sup> betona [17]

Sastavne komponente	SCC5	SCC6	SCC7
(kg)			
Cement	400	380	380
Voda	200	220	190
v/c	0.5	0.42	0.5
Filer(reciklirani beton)	50		
Silikatna prašina		75	
Metakaolin			75
Supreplastifikator FTF	4.8	5.46	5.46
Agregat 0-2	516.1	544.2	508.2
4-8	531.8	560.7	523.6
UKUPNO:	1702.7	1785.4	1682.2

### 5.3 Rezultati ispitivanja provedenih u svježem stanju

Ispitivana svojstva samozbijajućeg betona provedena su prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Postupci ispitivanja provedeni su kako je opisano u poglavlju 3. U idućim tablicama prikazane su ispitane vrijednosti svojstava svježeg betona.

#### 5.3.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem

Tablica 5.2. prikazuje rezultate rasprostiranja slijeganjem.

*Tablica 5.2. Rezultati rasprostiranja –slijeganjem [17]*

Oznaka uzorka	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	SF [mm]	T <sub>500</sub> [s]	Razred SF	Razred VS
SCC5	640	640	640	2.59	SF2	VS2
SCC6	570	520	545	1.69	-	VS1
SCC7	730	700	715	2.22	SF2	VS2

Mješavina SCC5 ima najduže vrijeme rasprostiranja, 2,59 s. Nema odvajanja krupnog agregata u sredini kao ni odvajanja vode na krajevima.

Mješavina SCC6 nije zadovoljila s rezultatom rasprostiranja SF.

#### 5.3.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom

Tablica 5.3. prikazuje rezultate ispitivanja V-lijevkom, te je vidljivo da sve tri mješavine spadaju u razred VF1 što znači da im je vrijeme tečenja svježe betonske mase <9,0 sekundi.

*Tablica 5.3. Rezultati ispitivanja V-lijevkom (vrijeme istjecanja) [17]*

Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak, tv [s]	Razred
SCC5	4,69	VF1
SCC6	6,33	VF1
SCC7	7.49	VF1

### 5.3.3 Rezultati ispitivanja L-posudom i J-prstenom

Tablica 5.4. prikazuje rezultate ispitivanja L-posudom kojom se određuje sposobnost prolaska betona kroz uske otvore između tri armaturne šipke bez segregacije i blokiranja.

Tablica 5.4. Rezultati ispitivanja L-posudom [17]

Oznaka uzorka	$\Delta H_{11}$ [mm]	$\Delta H_{12}$ [mm]	$\Delta H_{13}$ [mm]	$\Delta H_{1,av}$ [mm]	$\Delta H_{21}$ [mm]	$\Delta H_{22}$ [mm]	$\Delta H_{23}$ [mm]	$\Delta H_{2,av}$ [mm]	$H_1=600$ - $\Delta H_{1,av}$ [mm]	$H_2=150$ - $\Delta H_{2,av}$ [mm]	PA	Razred
SCC5	485	505	505	498,33	70	68	75	71	101,67	79	0,78	-
SCC6	455	465	450	456,67	90	85	90	88,3	143,33	61,67	0,43	-
SCC7	495	500	505	500	60	65	60	61,7	100	88,33	0,88	PA2

Da bi se postigla dovoljno dobra sposobnost zaobilaženja prepreka, beton mora imati dovoljno paste te mu se mora osigurati viskoznost.

Tablica 5.5. prikazuje rezultate ispitivanja J-prstenom kojim se definira svojstvo prolaznosti samozbijajućeg betona i otpornost prema segregaciji.

Tablica 5.5. Rezultati ispitivanja J-prstenom [17]

Oznaka uzorka	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	SF [mm]	$T_{500}$ [s]	$\Delta h_0$ [mm]	$\Delta h_{21}$ [mm]	$\Delta h_{22}$ [mm]	$\Delta h_{23}$ [mm]	$\Delta h_{2,av}$ [mm]	PJ	Razred
SCC5	605	650	627,5	5,62	96	120	123	125	125	27,25	-
SCC6	390	400	395	$\infty$	70	105	110	110	105	37,5	-
SCC7	710	640	675	2,52	105	130	130	135	125	25	-

Ni jedna mješavina ne zadovoljava kriterij ispitivanja J-prstenom.

### 5.3.4 Sadržaj pora betonskih mješavina

Sadržaj pora betonskih mješavina ispituje se prema normi HRN EN 12350-7. Ova norma specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće, te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm. Sadržaj zraka u svježem betonu ispituje se pomoću porometra. Tablica 5.6. prikazuje sadržaj pora ispitivanih betonskih mješavina.

Tablica 5.6. Sadržaj pora betonskih mješavina [17]

Oznaka uzorka	Sadržaj pora [%]
SCC5	sadržaj pora nije se mjerio
SCC6	6,80
SCC7	6,10

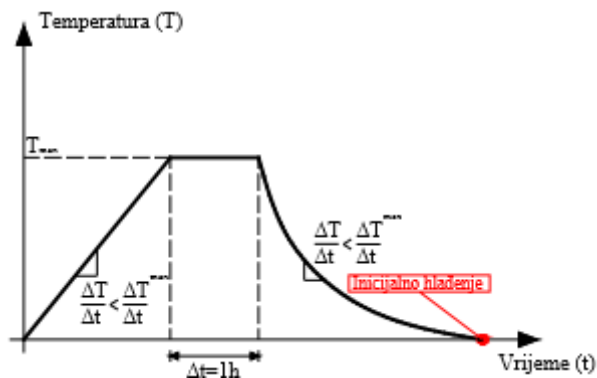
## 6 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NA POŽAR

U okviru eksperimentalnog istraživanja prikazanog u ovom radu ispitana su rezidualna mehanička svojstva uzoraka samozbijajućeg laganog betona. Ispituju se tri mješavine sa različitim dodacima, starosti tri godine. Nakon zagrijavanja uzoraka na visokim temperaturama (300°C, 500°C i 700°C) i procesa naglog hlađenja vodom provedeno je mjerenje mase, dimenzija uzoraka i brzine ultrazvuka na svakom uzorku mješavine. Nakon toga uzorci su tlačno opterećivani u hidrauličkoj preši do pojave loma. U nastavku ovog poglavlja detaljno se prikazuju svi koraci provedeni u eksperimentalnom radu.

### 6.1 Postupak ispitivanja

Korištena eksperimentalna procedura nalaže da se ispitivanje obavlja u serijama od 3 uzorka. Uzorci su cilindričnog oblika dimenzija Ø75/225 mm. Navedene dimenzije su u skladu s preporukama RILEM odbora za ispitivanje tlačne čvrstoće. Uzorci su sušeni 24 sata na temperaturi od 100°C, te zagrijavani na 300°C, 500°C i 700°C. Ispituju se tri različite mješavine lakog betona s sastavima navedenim ranije. Kod mješavine SCC5 ispitivano je 27 uzoraka, dok kod preostale dvije mješavine ispitivanje se provodilo nad 24 uzorka. Navedena razlika broja uzoraka posljedica je toga što se u SCC5 ispitivanje provodilo na još dodatna 3 uzorka pri sobnoj temperaturi, odnosno isti nisu podvrgnuti niti procesu sušenja, niti procesu zagrijavanja. Dakle osim navedena 3 uzorka u mješavini SCC5 u svakoj od mješavina, šest uzoraka je sušeno u sušioniku na 100°C, te po šest uzoraka pečeno na temperaturu od 300°C, 500°C i 700°C za svaku mješavinu. Na slici 6.1. prikazan je ciklus zagrijavanja uzoraka s karakterističnim parametrima. Brzina zagrijavanja uzoraka je 1-2.5°C/min do željene temperature. Nakon postizanja ciljane temperature, uzorci su držani na toj temperaturi u vremenu od 2,5 sata. Nakon toga, uzorci su izvađeni iz električne peći te naglo hlađeni vodom kao što je prikazano na slici 6.2.a). Hlađenje vodom se provodilo pomoću prskalice za vodu pri konstantnom tlaku od oko 2.2 bara u cijelom vremenu hlađenja uzoraka (slika 6.2.b)). Mjerenja mase, dimenzija i dinamičkog modula elastičnosti provedena su za svaki uzorak prije sušenja, poslije sušenja i nakon pečenja kada se uzorak naglo ohladio vodom na maksimalnu temperaturu do 40°C. Nakon faze hlađenja uzorci su ispitivani u hidrauličkoj preši s stopom prirasta opterećenja od 1,6 kN/s. Na slici 6.3.a) prikazan je sušionik u kojem su uzorci držani 24 sata na temperaturi

od 100°C, a na slici 6.3.b) električna peć čiji je kapacitet zagrijavanja maksimalno tri uzorka istovremeno.



Slika 6.1. Prikaz ciklusa zagrijavanja uzoraka [5]

a)



b)

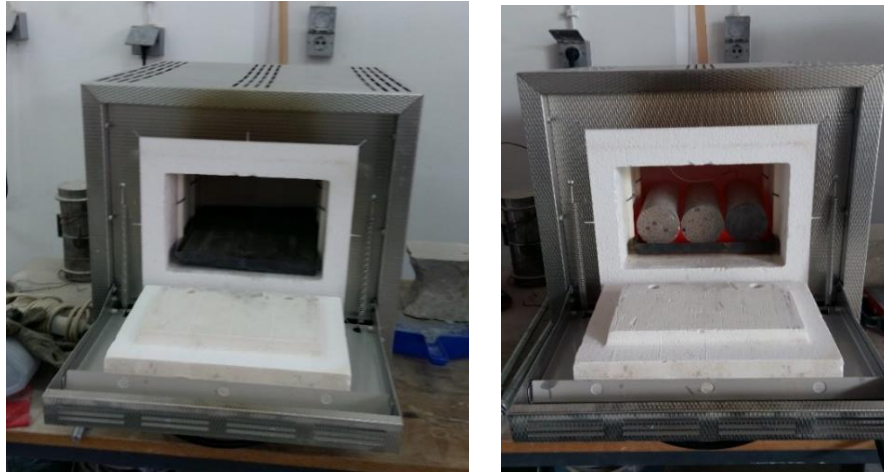


Slika 6.2. a) Hlađenje uzoraka vodom; b) vrijednost tlaka u pumpi [slike zabilježene tijekom ispitivanja]

a)





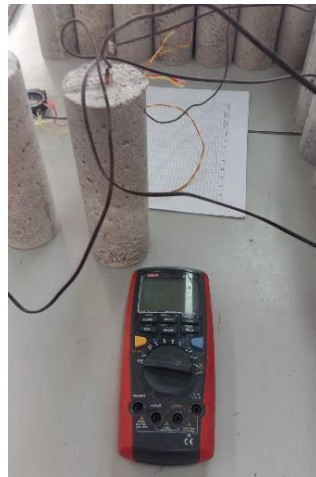


b)

*Slika 6.3. a) Sušionik; b) električna peć [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

U osi uzoraka 12, 18 i 24 mješavine SCC5 u svježem stanju postavljen je termopar s ciljem promatranja temperature unutar strukture uzoraka neposredno nakon njihovog izvlačenja iz peći, kao i pad temperature tijekom procesa hlađenja vodom. Termopar se sastoji od dvije žice spojene na jednom kraju unutar uzorka. Na slici 6.4.a) prikazan je uređaj koji mjeri temperaturu uzoraka pomoću termopara, a na slici 6.4.b) uređaj koji očitava površinsku temperaturu uzoraka pomoću lasera.

a)



b)



*Slika 6.4. a) i b) Uređaji za mjerenje temperature uzoraka [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

## 6.2 Rezultati i analiza ispitivanja naglo hlađenih uzoraka

### 6.2.1 Tlačna čvrstoća

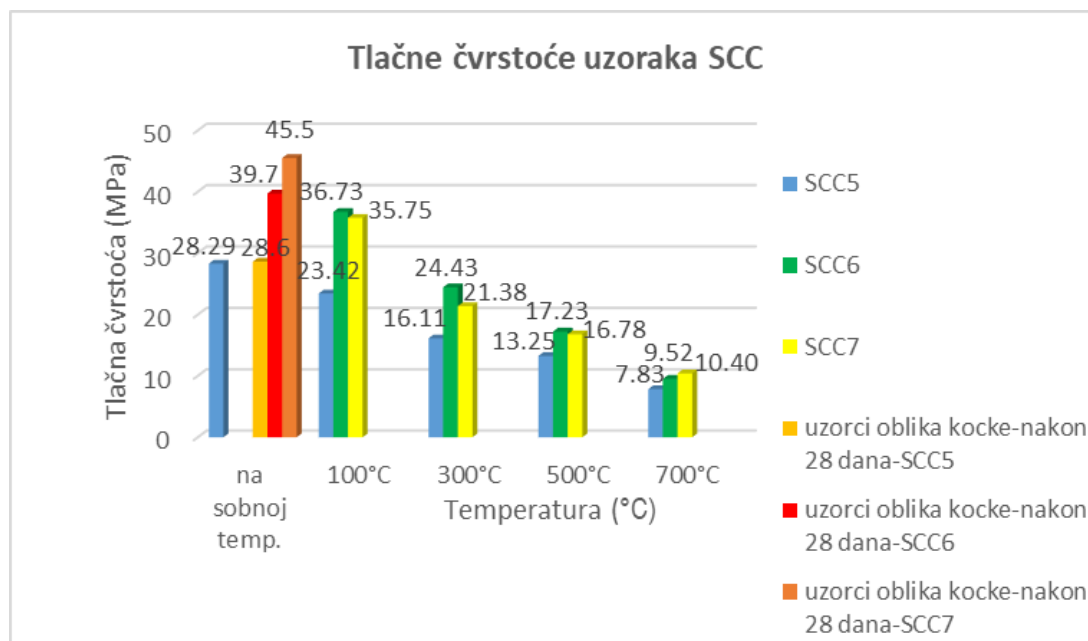
Ispitivanja tlačne čvrstoće provodila su se nakon procesa naglog hlađenja vodom, kada je temperatura uzorka pala ispod 40°C. Navedeni postupak je korišten za sve tri mješavine, osim izuzetaka kod mješavine SCC7, čiji rezultati su zasebno prikazani. Uzorci su cilindričnog oblika promjera baze 75 mm i visine 225 mm, starosti tri godine. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.1. Ispitivanje tlačnih čvrstoća uzoraka SCC6 i SCC7 pri sobnoj temperaturi (bez prethodnog procesa sušenja i pečenja) nisu obavljena. Kao posljedica toga, u nastavku rada rezultati navedenih mješavina uspoređivat će se s rezultatima tlačne čvrstoće uzoraka oblika kocke, s bridom duljine 15 cm, dobivenih nakon 28 dana i preuzetih iz diplomskog rada [17]. U tablici su obojani navedeni rezultati. Ti rezultati dobiveni su na vodom zasićenim uzorcima kocke stranice 15 cm.

Vrijednosti dobivene nakon 28 dana:

- 28,60 MPa za SCC5; 39,70 MPa za SCC6; 45,50 MPa za SCC7

Tablica 6.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka uzorka	Tlačna čvrstoća (Mpa)					
	na sobnoj temp.		100°C	300°C	500°C	700°C
SCC5	28.60	28.29	23.42	16.11	13.25	7.83
SCC6	39.70		36.73	24.43	17.23	9.52
SCC7	45.50		35.75	21.38	16.78	10.40



Slika 6.5. Grafički prikaz tlačne čvrstoće



*Slika 6.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC5 [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*





*Slika 6.7. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC6 [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*



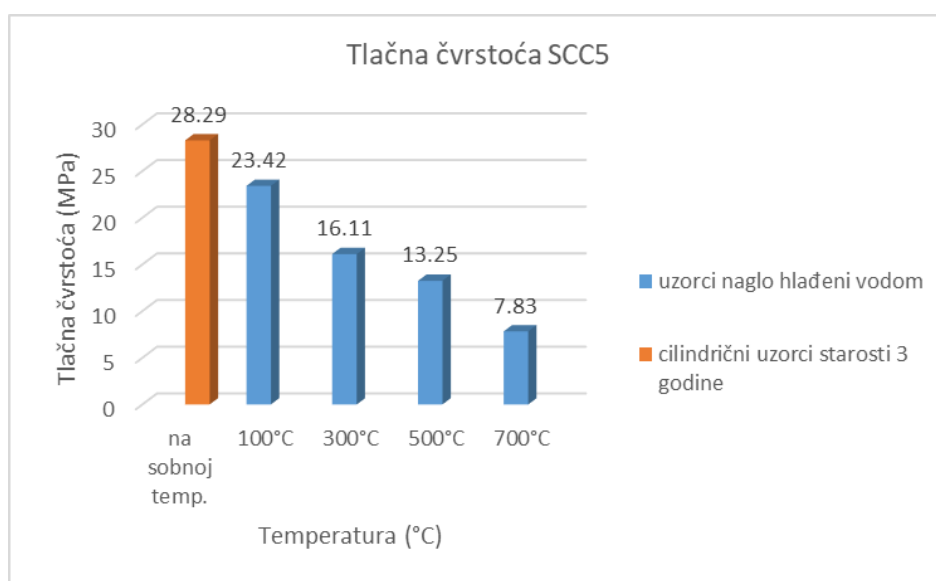
*Slika 6.8. Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC7 [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*



Iz slike 6.5. vidljiv je pad vrijednosti tlačne čvrstoće s povećanjem temperature zagrijavanja uzoraka i s obzirom na sastav betonskih mješavina. Cilindrični uzorci mješavine SCC5 starosti tri godine čija se tlačna čvrstoća ispitivala pri sobnoj temperaturi pokazuju približno istu vrijednost u odnosu na tlačnu čvrstoću dobivenu na uzorcima oblika kocke nakon starosti betona od 28 dana, iako se uzorci razlikuju po obliku i vlažnosti.

Kod SCC5 mješavine sa filerom od recikliranog betona vidljiv je gubitak tlačne čvrstoće s porastom temperature zagrijavanja uzoraka. Nakon sušenja uzoraka 24 sata u sušioniku, hlađenja vodom te ispitivanja istih uočen je pad tlačne čvrstoće u vrijednosti od 17 % u odnosu na vrijednost dobivenu na cilindričnim uzorcima koji su ispitivani pri sobnoj temperaturi i koji nisu bili podvrgnuti nikakvom procesu grijanja i sušenja (navedeni rezultati uzoraka na sobnoj temperaturi prikazani su drugom bojom na slici 6.9). Ovaj rezultat je u skladu sa dosadašnjim spoznajama da uzorci njegovani na zraku, a ispitani u vlazi imaju nižu čvrstoću u odnosu na istovrsne uzorke koji su ispitani na suhom. Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C zadržali su 57 %, dok su oni grijani na 500°C imali oko 47 % od početne vrijednosti.

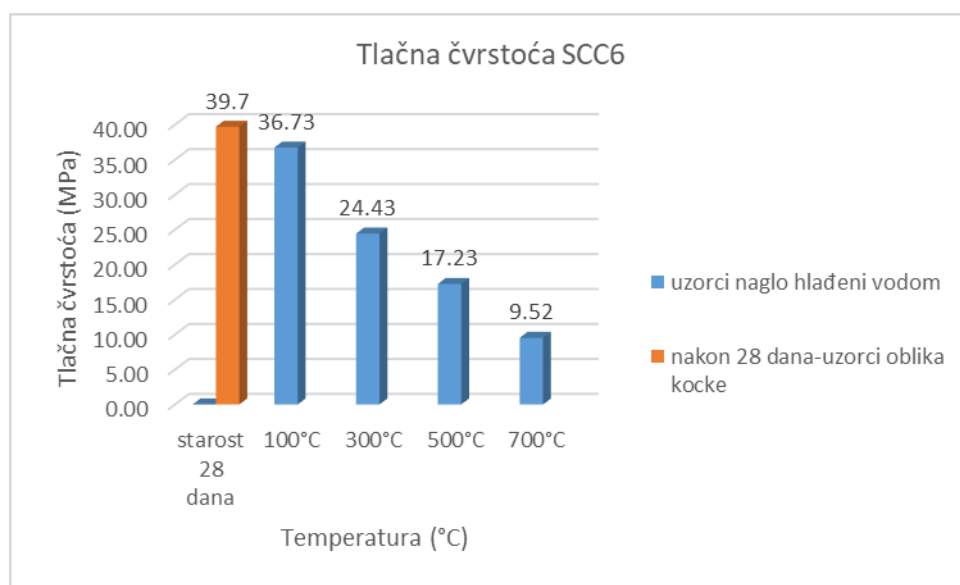
Najmanja vrijednost tlačne čvrstoće zabilježena je kod uzoraka koji su zagrijavani u električnoj peći na temperaturi od 700°C i naglo hlađeni vodom. Vidljivo je da navedeni uzorci imaju tlačnu čvrstoću od samo 28 % početne vrijednosti. Na slici 6.9. prikazane su vrijednosti navedenih tlačnih čvrstoća u MPa. Uočeno je da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a značajan pad događa se u intervalu temperature od 100°C do 300°C.



Slika 6.9. Tlačna čvrstoća SCC5

Kod mješavine SCC6 sa dodatkom filera od silikatne prašine također je vidljiv pad tlačne čvrstoće s povećanjem temperature zagrijavanja uzoraka. Nakon sušenja uzoraka 24 sata u sušioniku te ispitivanja istih uočen je pad tlačne čvrstoće u uprosječnoj vrijednosti od 7,5 % u odnosu na referentnu vrijednost dobivenu ispitivanjem u hidrauličkoj preši na uzorcima oblika kocke starim 28 dana. Vrijednost dobivena nakon 28 dana prikazana je drugom bojom na slici 6.10. Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C zadržali su 62%, dok su oni grijani na 500°C imali oko 43% od početne vrijednosti.

Najmanja vrijednost tlačne čvrstoće zabilježena je kod uzoraka koji su zagrijavani u električnoj peći na temperaturi od 700°C i naglo hlađeni vodom. Vidljivo je da navedeni uzorci zadržavaju približno četvrtinu vrijednosti početne tlačne čvrstoće. Na slici 6.10. prikazane su vrijednosti navedenih tlačnih čvrstoća u MPa. Uočava se da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a značajan pad događa se u intervalu temperature od 100°C do 300°C.

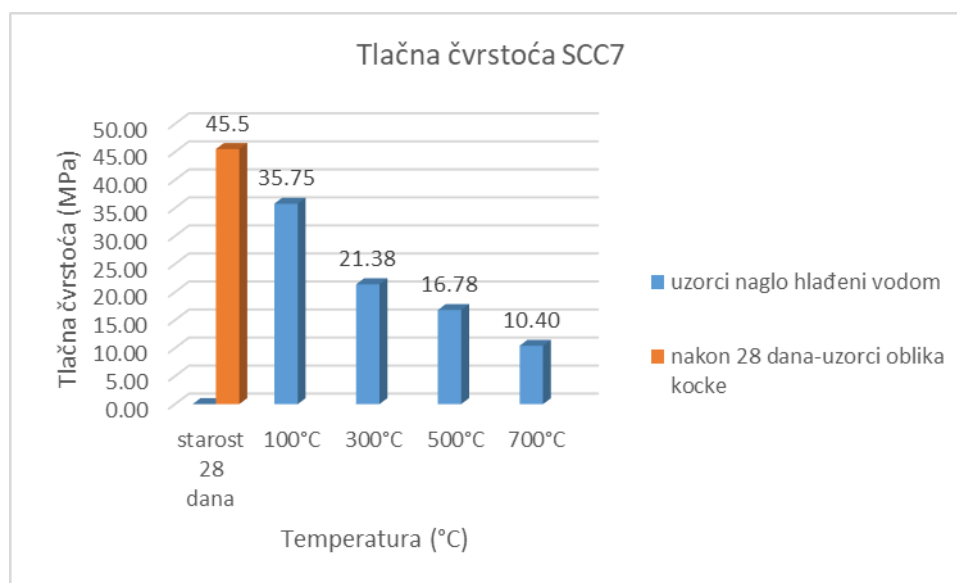


Slika 6.10. Tlačna čvrstoća SCC6

Generalno gledajući uzorke mješavine SCC7 s dodatkom filera od metakaolina koji su tretirani usvojenom osnovnom procedurom, vidljivo je isto ponašanje kao i kod prethodne dvije mješavine, odnosno smanjenje tlačne čvrstoće izraženije je s povećanjem vrijednosti temperature pečenja. Nakon sušenja uzoraka 24 sata u sušioniku te ispitivanja istih uočen je pad tlačne čvrstoće u vrijednosti od 21 % u odnosu na vrijednost dobivenu ispitivanjem u hidrauličkoj preši na uzorcima oblika kocke starim 28 dana. Vrijednost dobivena nakon 28 dana prikazana je drugom bojom na slici 6.11. Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C

zadržali su 47 %, dok su oni grijani na 500°C imali oko 37 % vrijednosti početne tlačne čvrstoće.

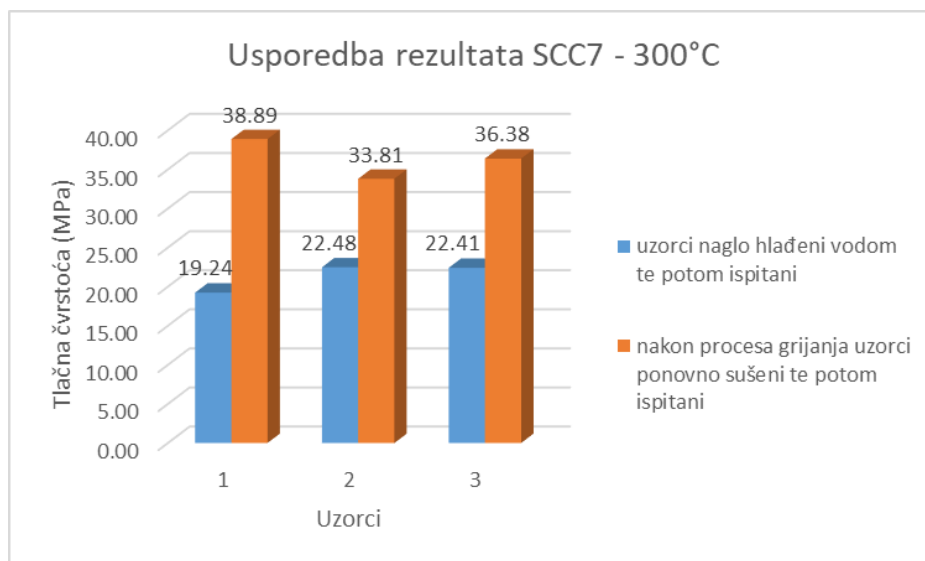
Najmanja vrijednost tlačne čvrstoće zabilježena je kod uzoraka koji su zagrijavani u električnoj peći na temperaturi od 700°C i naglo hlađeni vodom. Vidljivo je da navedeni uzorci imaju tlačnu čvrstoću od samo 23 % od referentne vrijednosti. Na slici 6.11. prikazane su vrijednosti navedenih tlačnih čvrstoća u MPa. Uočava se da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a značajan pad se događa, kao i u prethodne dvije mješavine, u intervalu temperature od 100°C do 300°C.



Slika 6.11. Tlačna čvrstoća SCC7

Kod mješavine SCC7 uzorci 7, 8 i 9 nakon pečenja na 300°C i naglog hlađenja vodom ponovno su sušeni u sušioniku, te tek onda ispitani u hidrauličku prešu. Cilj je utvrditi je li gubitak čvrstoće zbog naglog hlađenja nakon zagrijavanja trajan, te hoće li se uklanjanjem vode iz uzoraka „vratiti“ čvrstoća. Ponovno sušeni uzorci pokazuju u prosjeku 42 % veće vrijednosti tlačne čvrstoće u odnosu na iste uzorke koji su ispitani neposredno nakon procesa naglog hlađenja. Dio povećanja može se objasniti stanjem vlažnosti uzoraka, naime u literaturi (Ukrainczyk) se navodi da ta razlika može biti i do 20 %. Moguće da je osim utjecaja vlažnosti došlo i do nekih drugih efekata uslijed vlaženja i sušenja, poput naknadne hidratacije, no to bi trebalo još detaljnije ispitati. Slika 6.12. prikazuje usporedbu tih rezultata.



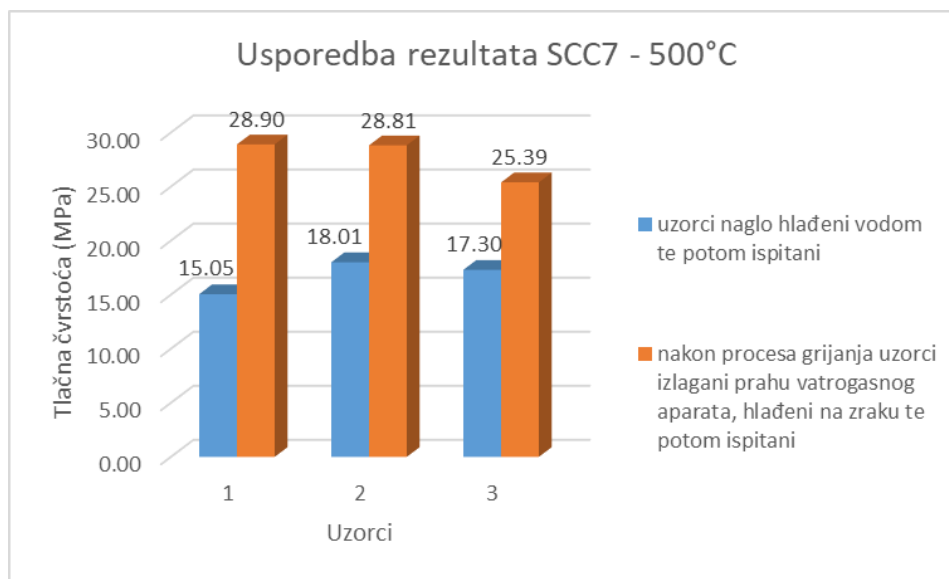


*Slika 6.12. Usporedba rezultata SCC7*

Uzorci 16, 17 i 18 mješavine SCC7 nakon pečenja na temperaturi od 500°C izloženi su prahu vatrogasnog aparata. S obzirom da po svojim karakteristikama navedeni aparat ne služi za hlađenje već samo za spriječavanje širenja vatre, uzorci su ohlađeni na zraku dok nisu postigli željenu temperaturu od maksimalno 40°C. Sredstvo za gašenje je suhi prah, koji se iz aparata izbacuje pomoću plina CO<sub>2</sub> (slika 6.13.). Na slici 6.14. prikazane su dobivene vrijednosti. Uočeno je da uzorci koji su ispitivani neposredno nakon procesa naglog hlađenja vodom imaju oko 40% manju vrijednost tlačne čvrstoće od onih koji su izloženi prahu te hlađeni na zraku.

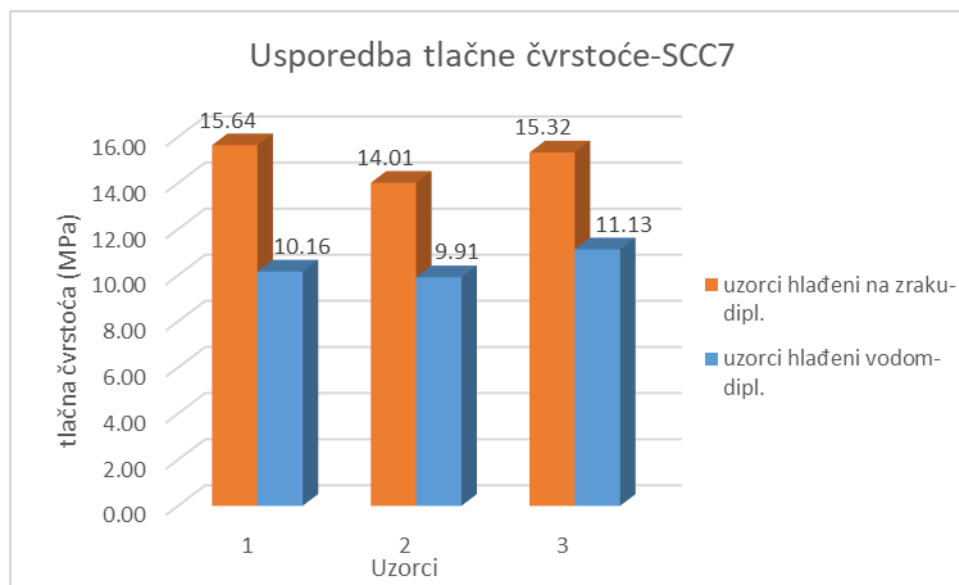


*Slika 6.13. Izlaganje uzoraka prahu vatrogasnog aparata [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*



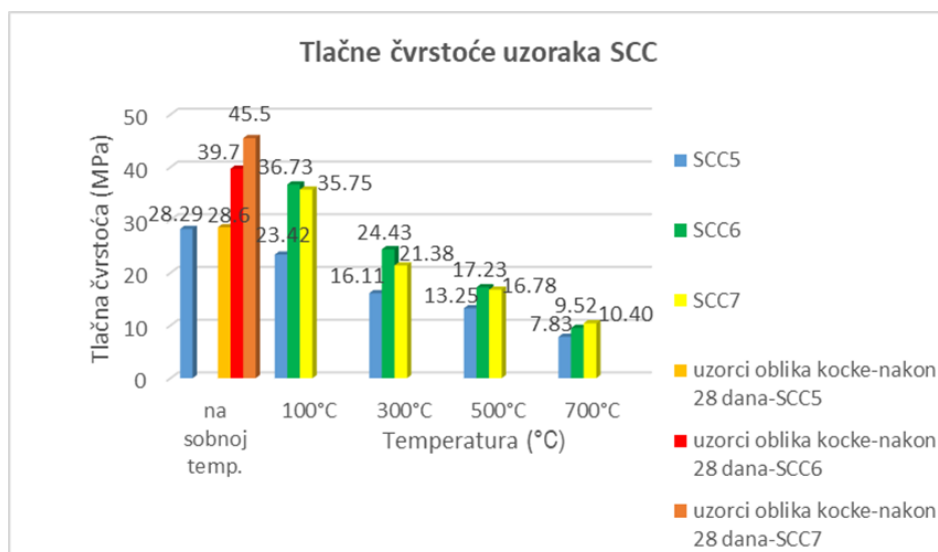
Slika 6.14. Usporedba rezultata SCC7 naglo hlađenih vodom i prahom vatrogasnog aparata

Uzorci 22, 23 i 24, nakon izlaganja temperaturi od 700°, nisu hlađeni vodom već su isti ostavljeni na zraku do postizanja optimalne temperature pri kojoj se provodilo ispitivanje. Na slici 6.15. vidljivo je da uzorci hlađeni vodom imaju oko 70% od vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih na zraku. Navedeni grafički prikaz još je jedan dokaz u nizu da s izlaganjem uzoraka vodom opada vrijednost tlačne čvrstoće, što je su skladu s dosadašnjim ispitivanjima provedenim u ovom radu, kao i u radovima navedenim u poglavlju 4.



Slika 6.15. Usporedba rezultata uzoraka naglo hlađenih vodom i hlađenih na zraku

Na slici 6.16. prikazane su dobivene vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina SCC5, SCC6 i SCC7 u ovisnosti o razini temperature zagrijavanja.



Slika 6.16. Tlačna čvrstoća betona SCC5, SCC6 i SCC7

Vidljivo je da uzorci mješavine SCC5 s dodatkom filera od recikliranog betona pokazuju najmanje vrijednosti tlačne čvrstoće, bez obzira na temperaturu zagrijavanja. Uzorci mješavine SCC6 bilježe najveće vrijednosti nakon zagrijavanja uzoraka na 100°C, 300°C i 500°C, dok uzorci mješavine SCC7 s dodatkom filera od metakaolina pokazuju najveće vrijednosti pri starosti betona od 28 dana kao i nakon pečenja na 700°C.

### 6.2.2 Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti dobiva se ultrazvučnom metodom na način da se kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi, nakon čega se na uređaju očitava njihovo vrijeme prolaska kroz uzorak. Iz dobivenog vremena računa se brzina prolaza valova. Na temelju tih podataka može se izračunati dinamički modul elastičnosti:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [GPa], \quad (5)$$

gdje je:

v-brzina ultrazvučnog vala [m/s]

ρ-gustoća betona [kg/m<sup>3</sup>]

μ –poissonov koeficijent [μ =0.2]



*Slika 6.17. Uređaj za mjerenje brzine ultrazvučnih valova [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Poissonov koeficijent se malo mijenja s promjenom vodocementnog faktora, a smanjuje se s smanjenjem vlažnosti. Za vlažni cementni kamen približno je 0.25, a za suhi oko 0.15. Kod plošnih i prostornih elemenata uzima se prosječna vrijednost 0.20. [5]

Različita djelovanja imaju značajne utjecaje na rezultate ispitivanja brzine ultrazvuka. Promjena u intervalu temperature od 10°C do 30°C ne uzrokuje bitne promjene, no ekstremno visoke temperature koje se javljaju kod požara utječu na brzine ultrazvuka jer dolazi do mikro raspucavanja. Isto tako, vlažnost ima značajan utjecaj. Vrijednosti brzine ultrazvuka variraju kroz vodom zasićen uzorak betona u odnosu na suhi.

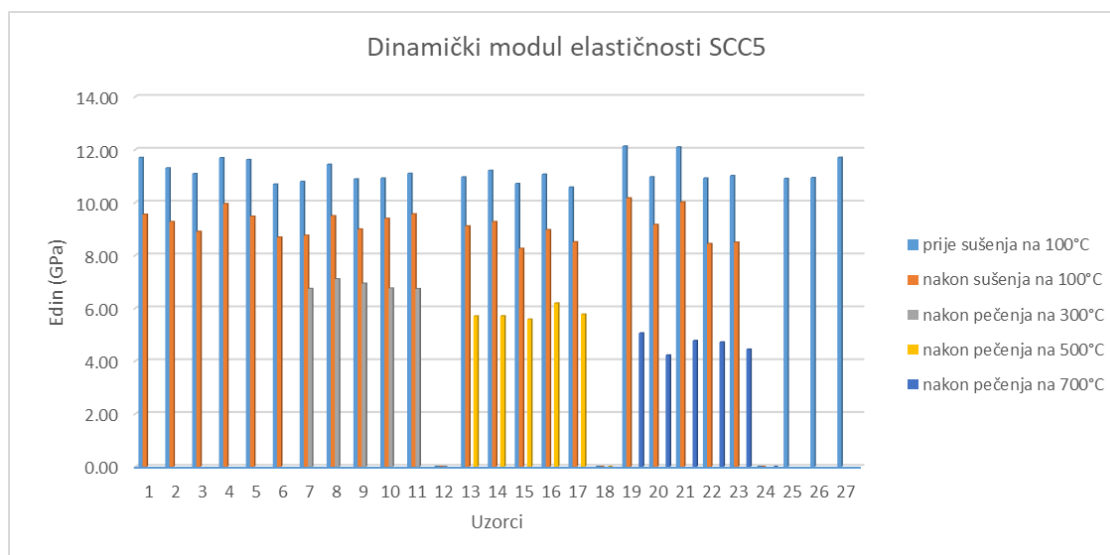
Dobivene vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti u ovom radu ne mogu se sve uspoređivati, jer su uzorci tretirani vodom neposredno nakon njihovog izvlačenja iz peći što utječe na rezultate, nego samo uzorci koji su jednako tretirani.

Na mjestima u tablici 6.2. u kojima nije prikazana vrijednost dinamičkog modula elastičnosti isti nije bilo moguće odrediti zbog nemogućnosti mjerenja na uzorcima nepravilne površine baze. Dakle uzorci moraju biti obrušeni na mjestima prianjanja uzorka i sonde aparata. Navedeni uzorci, kao što je ranije navedeno, koristili su se za očitavanje temperature unutar uzoraka jer su kroz os imali termopar. Radi se o uzorcima 12, 18 i 24 mješavine SCC5.

Rezultati uzoraka mješavine SCC7 koji su tretirani drugačije od standardne procedure prikazani su na slici 6.20. u prikazu svih dobivenih vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti, ali i kasnije uspoređeni zasebno s uzorcima koji su podvrgnuti istom režimu zagrijavanja, ali hlađeni usvojenom procedurom ovog rada. Obojana mjesta u tablici 6.4. pripadaju upravo rezultatima uzoraka mješavine SCC7 koji nisu tretirani standardnim postupkom.

Tablica 6.2. Rezultati dinamičkog modula elastičnosti SCC5

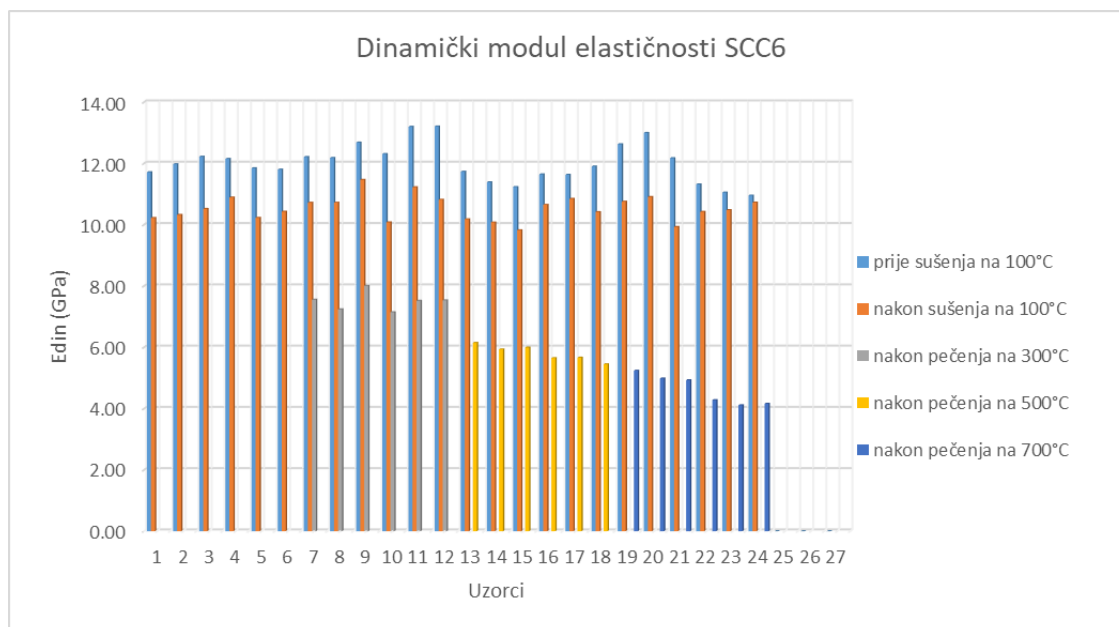
SCC5	Dinamički modul elastičnosti (GPa)				
	prije sušenja na 100°C	nakon sušenja na 100°C	nakon pečenja		
			300°C	500°C	700°C
1	11.69	9.54			
2	11.30	9.27			
3	11.08	8.89			
4	11.68	9.95			
5	11.61	9.47			
6	10.69	8.68			
7	10.79	8.75	6.73		
8	11.43	9.49	7.10		
9	10.88	8.98	6.93		
10	10.91	9.38	6.75		
11	11.09	9.56	6.73		
12	-	-	-		
13	10.95	9.10		5.70	
14	11.21	9.27		5.70	
15	10.71	8.25		5.57	
16	11.06	8.96		6.18	
17	10.57	8.50		5.76	
18	-	-		-	
19	12.12	10.16			5.05
20	10.96	9.15			4.22
21	12.09	10.01			4.76
22	10.91	8.43			4.71
23	11.01	8.48			4.44
24	-	-			-
25	10.90				
26	10.93				
27	11.70				



Slika 6.18. Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti SCC5

Tablica 6.3. Rezultati dinamičkog modula elastičnosti SCC6

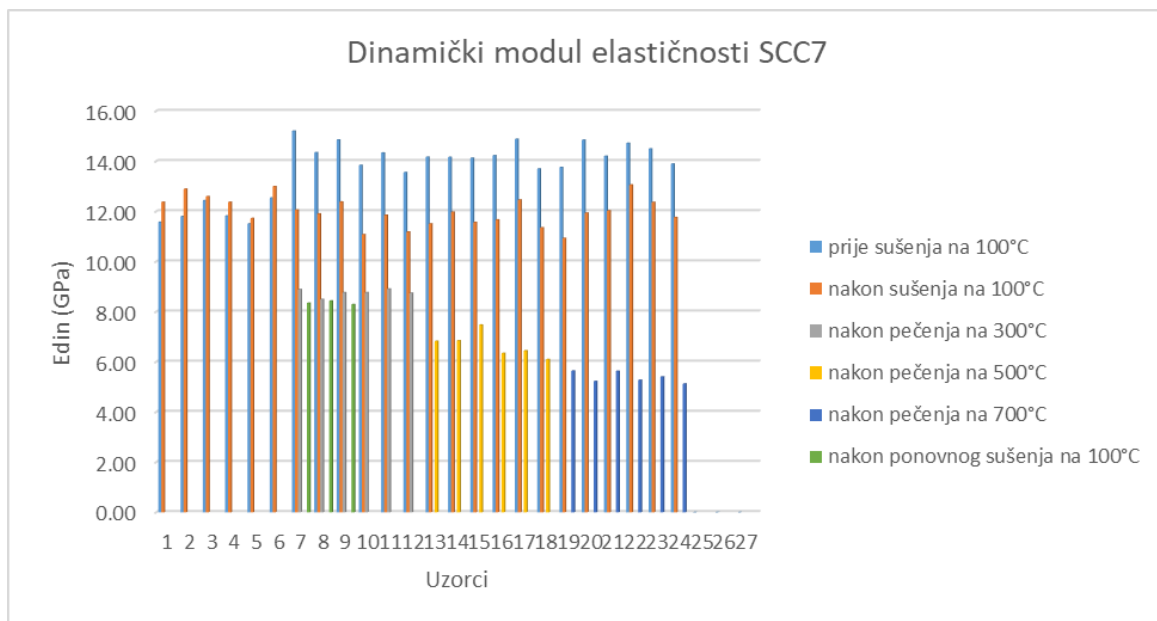
SCC6	Dinamički modul elastičnosti (GPa)				
	prije sušenja na 100°C	nakon sušenja na 100°C	nakon pečenja		
Uzorak			300°C	500°C	700°C
1	11.72	10.22			
2	11.98	10.32			
3	12.22	10.52			
4	12.15	10.89			
5	11.85	10.23			
6	11.80	10.43			
7	12.21	10.72	7.56		
8	12.18	10.72	7.24		
9	12.69	11.47	8.01		
10	12.31	10.08	7.15		
11	13.20	11.23	7.52		
12	13.21	10.82	7.53		
13	11.73	10.18		6.15	
14	11.39	10.08		5.94	
15	11.23	9.82		6.00	
16	11.65	10.65		5.65	
17	11.63	10.85		5.67	
18	11.90	10.42		5.45	
19	12.63	10.75			5.24
20	13.00	10.91			4.99
21	12.17	9.93			4.93
22	11.32	10.42			4.28
23	11.05	10.48			4.11
24	10.95	10.72			4.16
25	-				
26	-				
27	-				



Slika 6.19. Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti SCC6

Tablica 6.4. Rezultati dinamičkog modula elastičnosti SCC7

Uzorak	Dinamički modul elastičnosti (GPa)					
	prije sušenja na 100°C	nakon sušenja na 100°C	nakon ponovnog sušenja na 100°C	nakon pečenja		
				300°C	500°C	700°C
1	11.57	12.37				
2	11.79	12.89				
3	12.43	12.59				
4	11.82	12.37				
5	11.50	11.72				
6	12.54	12.99				
7	15.20	12.06	8.34	8.89		
8	14.34	11.90	8.44	8.49		
9	14.85	12.38	8.29	8.76		
10	13.84	11.08		8.77		
11	14.33	11.85		8.91		
12	13.55	11.19		8.74		
13	14.17	11.50			6.83	
14	14.16	11.97			6.84	
15	14.13	11.56			7.48	
16	14.23	11.66			6.35	
17	14.88	12.46			6.44	
18	13.70	11.35			6.10	
19	13.75	10.93				5.64
20	14.84	11.94				5.22
21	14.20	12.03				5.63
22	14.72	13.06				5.27
23	14.49	12.36				5.40
24	13.89	11.76				5.12
25	-					
26	-					
27	-					



Slika 6.20. Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti SCC7

Analizom grafičkog prikaza dinamičkog modula elastičnosti betona na slikama 6.18. – 6.20. vidljiv je utjecaj pojedinih filera i temperatura na dinamički modul elastičnosti, a tablice 6.2.-6.4 prikazuju dobivene rezultate dinamičkog modula elastičnosti na temelju mjerenja brzina prolaska ultrazvuka i korištenjem gore navedene formule (5).

Kod SCC5 mješavine sa filerom od recikliranog betona dinamički modul elastičnosti nakon sušenja na 100°C za sve uzorke, pokazuje smanjenje u odnosu na dobivene vrijednosti prije procesa sušenja, za uprosječenu vrijednost od 18 %. Nakon pečenja na 300°C i procesa naglog hlađenja vodom vrijednost dinamičkog modula je oko 62 % od početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 53 %, a nakon 700°C je oko 41 % početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Kod SCC6 mješavine sa filerom od silikatne prašine smanjenje dinamičkog modula elastičnosti je oko 13 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke, u odnosu na dobivene vrijednosti prije procesa sušenja. Nakon pečenja na 300°C i procesa naglog hlađenja vodom vrijednost dinamičkog modula je oko 60 % početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 51 %, a nakon 700°C je oko 39 % početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Kod SCC7 mješavine sa filerom od metakaolina pojavljuje se povećanje dinamičkog modula elastičnosti za oko 6 % nakon sušenja na 100°C, u odnosu na dobivene vrijednosti prije procesa sušenja. Navedeno ponašanje je iznimka u ovome radu i isto se može definirati kao pogreška uređaja prilikom mjerenja. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja vodom vrijednost dinamičkog modula je oko 60 % početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 48 %, a nakon 700°C je oko 38 % početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

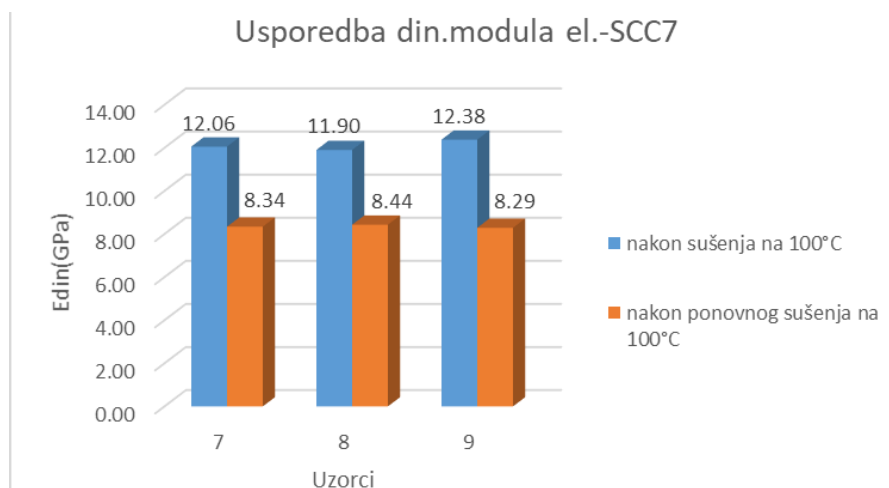
Svi navedeni postotci dobiveni su osrednjavanjem dobivenih rezultata.

Kao što je gore navedeno pojedini uzorci iz mješavine SCC7 nisu podvrgnuti usvojenom postupku hlađenja, odnosno neki uzorci su nakon procesa hlađenja ponovno podvrgnuti procesu sušenja. Njihovi rezultati u nastavku su uspoređeni s rezultatima dobivenim standardnim postupkom.

Kod mješavine SCC7 uzorci 7, 8 i 9 nakon pečenja na 300°C i naglog hlađenja vodom podvrgnuti su ponovnom procesu sušenja. Rezultati tog ispitivanja usporedit će se s rezultatima dobivenim nakon prvog procesa sušenja da se uoči utjecaj ponovnog sušenja na promjenu u veličini dinamičkog modula elastičnosti. Slika 6.21. prikazuje razliku u navedenim rezultatima.

Na slici 6.21. uočava se pad vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti navedenih uzoraka od oko 31 % u odnosu na rezultate dobivene na uzorcima nakon početnog sušenja na 100°C. Razlog tomu je što je tijekom procesa ponovnog sušenja došlo do veće pojave mikro raspucavanja unutar strukture betona.

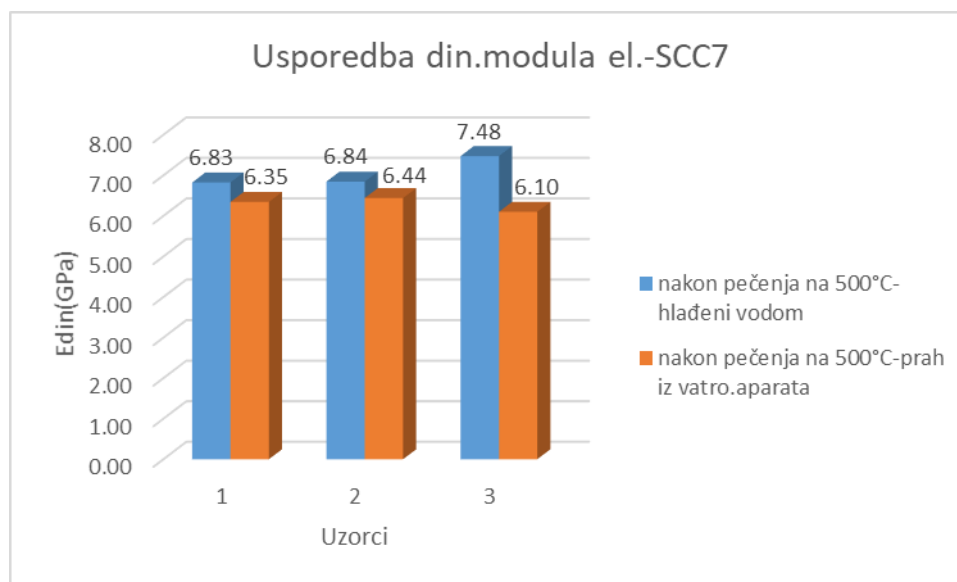




Slika 6.21. Usporedba dinamičkog modula elastičnosti uzoraka 7, 8 i 9 mješavine SCC7

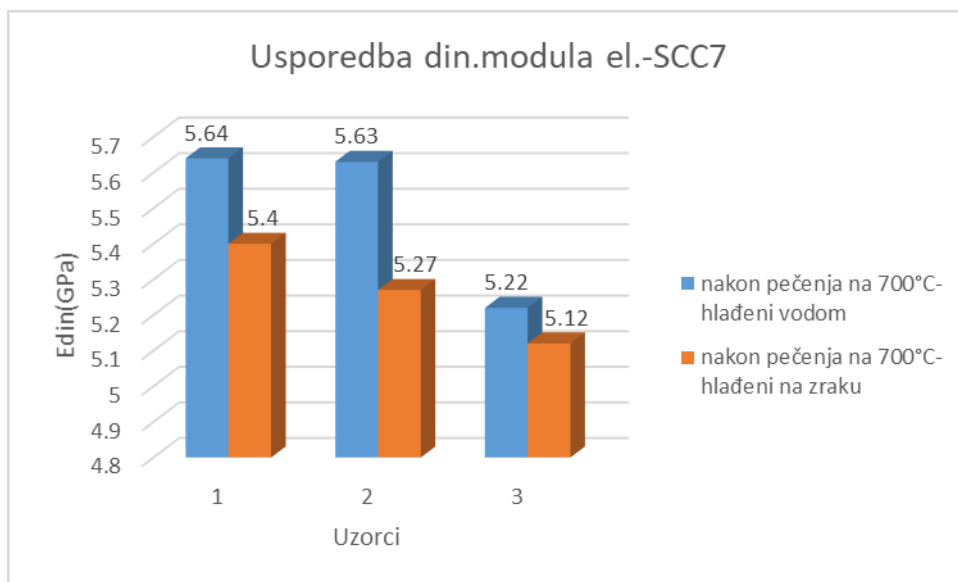
Uzorci 16, 17 i 18 mješavine SCC7 nakon zagrijavanja na temperaturi od 500°C izloženi su prahu vatrogasnog aparata. Na slici 6.22. vidljiva je razlika u vrijednostima dinamičkog modula elastičnosti naglo hlađenih uzoraka vodom i onih koji su izloženi prahu te potom hlađeni na zraku.

Prema slici 6.22. da se zaključiti kako uzorci koji su izloženi prahu vatrogasnog aparata imaju i do 18% manju vrijednost dinamičkog modula elastičnosti u odnosu na rezultate uzoraka hlađenih standardnim postupkom, što se može objasniti i time da vlažni uzorci imaju veću masu.



Slika 6.22. Usporedba dinamičkog modula elastičnosti mješavine SCC7

Uzorci 22, 23 i 24 nisu hlađeni vodom već su isti ostavljeni na zraku do postizanja optimalne temperature pri kojoj se provodilo ispitivanje. Na slici 6.23. vidljivo je da dinamički modul elastičnosti ima manju vrijednost kod uzoraka hlađenih na zraku, u odnosu na uzorke koji su hlađeni vodom. I ovdje razlika u masi uzoraka utječe na dobiveni rezultat.



Slika 6.23. Usporedba dinamičkog modula elastičnosti mješavine SCC7

Tablica 6.5. Ocjena kvalitete betona prema Neville-u [11]

Brzina ultrazvuka [km/s]	Kvaliteta betona
> 4,5	Odlična
3,5 - 4,5	Dobra
3,0 - 3,5	Sumnjiva
2,0 - 3,0	Loša
< 2,0	Potpuno loša

Analizom srednjih vrijednosti brzine ultrazvuka po mješavinama vidi se stanje u kojem se beton nalazi neposredno prije ispitivanja. Naime, uzorci u zasićenom stanju ispitivani u diplomskom radu [17] nakon 28 dana pokazuju dobru kvalitetu prema ocjeni Neville-u, jer su brzine ultrazvuka unutar intervala 3,5-4,5 km/s. Rezultati nakon 28 dana dobiveni su na kockama zasićenim vodom.

### 6.2.3 Promjena mase uzoraka

Analizom rezultata promjene mase uzoraka betona na slici 6.27. a), b) i c) uočen je utjecaj sastava betona, temperature zagrijavanja, kao i veliki utjecaj naglog hlađenja vodom na vrijednost mase. S tim u vezi uočeno je da dio vode ispari u direktnom kontaktu s zagrijanim uzorkom, a dio ostaje zarobljen u njegovoj strukturi. Uočeno je da uzorci koji su najdugotrajnije podvrgnuti procesu hlađenja vodom bilježe najveću porast mase. Rezultati uzoraka u mješavini SCC7 koji nisu hlađeni usvojenim postupkom prikazani su na ukupnom prikazu masa, kao i odvojeno uspoređeni s uzorcima koji su zagrijavani na istu temperaturu, ali hlađeni vodom.

Kod SCC5 mješavine sa filerom od recikliranog betona kod nekih uzoraka uočava se neznatno smanjenje mase od oko 0,5 %, do kod drugih vidljivo je neznatno povećanje mase uzoraka u odnosu na masu prije sušenja na 100°C za oko 0,3 %. To se može objasniti upravo utjecaju hlađenja uzoraka vodom. Dakle uzorci nakon sušenja imaju manju masu u odnosu na izmjerenu prije procesa sušenja, kao rezultat isparavanja zarobljene vode. Međutim uslijed hlađenja vodom dolazi do apsorpcije vode unutar uzoraka, što dovodi do povećanja mase uzoraka. Može se zaključiti da se uzorcima koji su u procesu hlađenja duže bili izloženi vodi masa povećala, odnosno masa apsorbirane vode je nadmašila masu vode koja je isparila u procesu sušenja. Uzorci koji bilježe manju masu od mase prije sušenja su apsorbirali manju količinu vode u odnosu na količinu koja je isparila. Kod mješavine SCC5 nakon pečenja na 300°C i naglog hlađenja vodom do postizanja optimalne temperature uzoraka od maksimalno 40°C, masa se povećala za uprosječenu vrijednost od 4,8 % u odnosu na masu dobivenu prije procesa sušenja istih, nakon 500°C za 8,7 %, a nakon 700°C bilježi se povećanje mase za oko 6,5 % od početne vrijednosti. Vidljivo je da se masa nakon pečenja na 700°C i procesa naglog hlađenja u prosjeku manje povećala nego nakon pečenja na 500°C. Na temelju toga, zaključuje se da je prilikom pečenja na 700°C isparila veća količina vode, u odnosu na količinu nakon pečenja na 500°C, no to bi trebalo još detaljnije ispitati. Dakle iako su uzorci nakon izlaganja višim temperaturama podvrgnuti dužem vremenu hlađenja vodom, količina apsorbirane vode, u odnosu na onu koja je isparila, manja je u odnosu na isti omjer pri temperaturi od 500°C. Također vidljivo je da nije došlo do ravnomjernog povećanja mase uzoraka jer isti nisu ravnomjerno izloženi vodi.

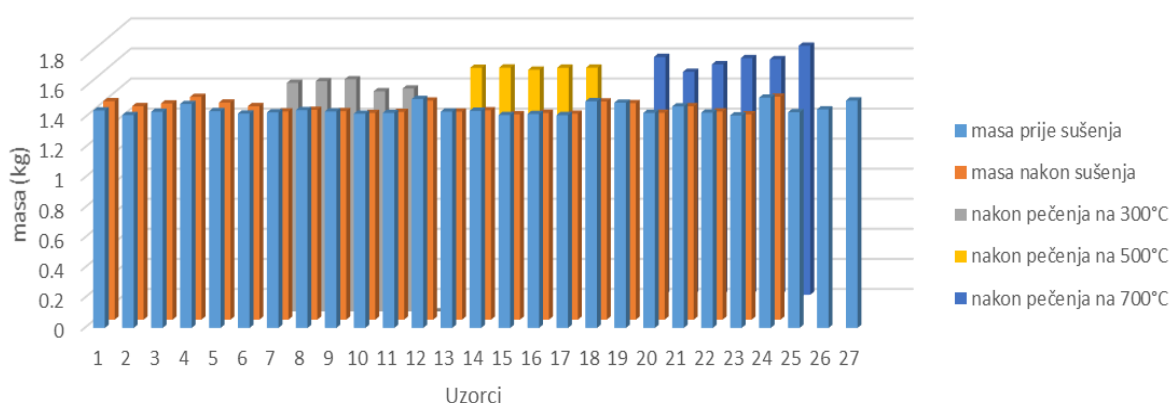
Kod SCC6 mješavine sa filerom od silikatne prašine smanjenje mase je oko 1 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i naglog hlađenja vodom masa se

povećala za uprosječenu vrijednost od 3,2 % u odnosu na masu dobivenu prije procesa sušenja, nakon 500°C za oko 4,8 %, a nakon 700°C masa je povećana za oko 7,9 % od početne mase.

Kod SCC7 mješavine sa filerom od metakaolina javlja se smanjenje mase za oko 0,8 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke, kao i povećanje mase od 0,5 % početne vrijednosti. S tim u vezi dovodi se zaključak isti kao i za mješavinu SCC5. Nakon pečenja na 300°C i naglog hlađenja vodom masa se povećala za oko 6,3 % u odnosu na masu dobivenu prije procesa sušenja, nakon 500°C za oko 9,3 %, a nakon 700°C masa je povećana za oko 7,9 % od vrijednosti početne mase. Isto ponašanje (u manjem postotku povećanja mase nakon grijanja i hlađenja na 700°C u odnosu na isti proces nakon 500 °C) koje se javilo kod mješavine SCC5 pojavljuje se i kod SCC7, te je shodno tome i jednak zaključak.

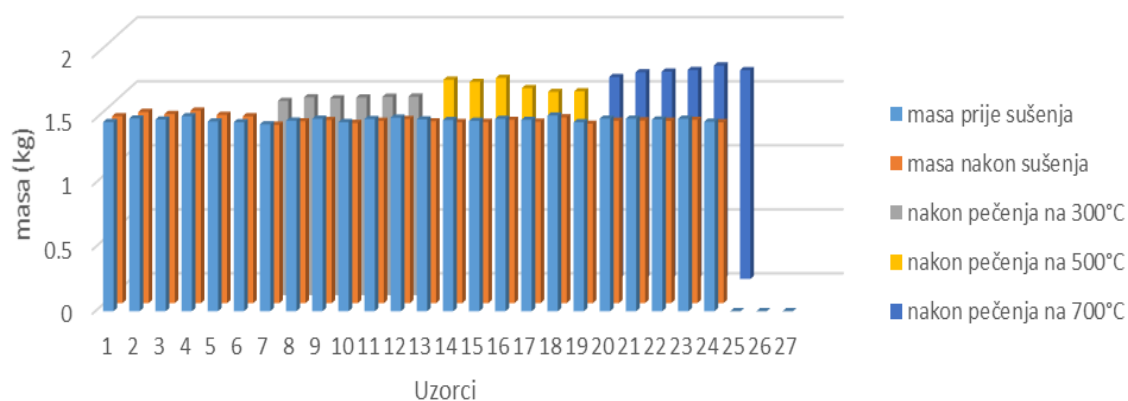
a)

**Promjena mase SCC5**

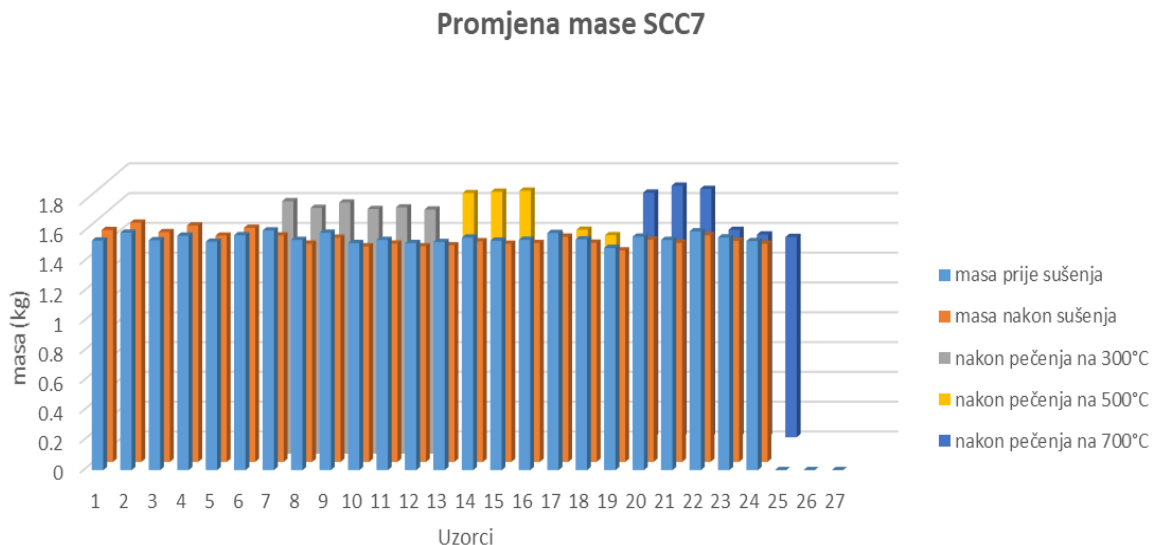


b)

**Promjena mase SCC6**



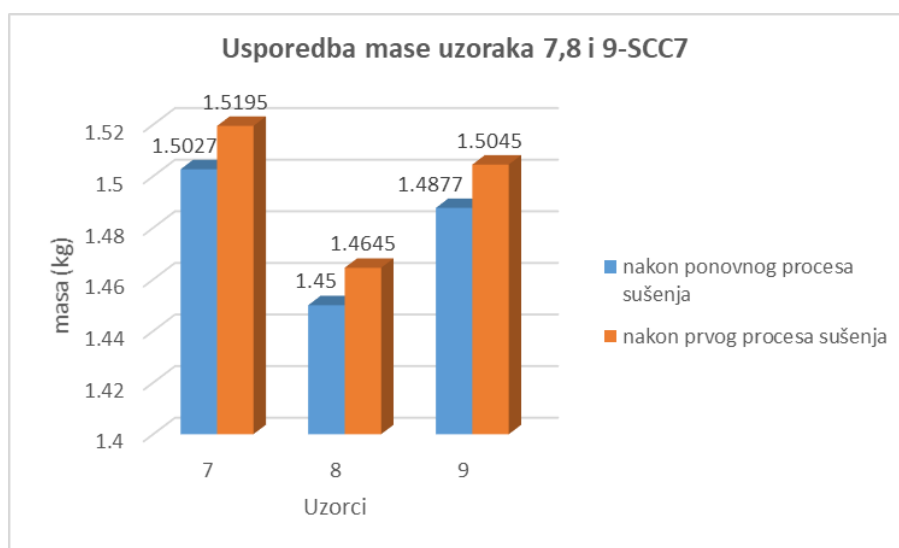
c)



Slika 6.27. Grafički prikaz promjene mase uzoraka po mješavinama; a) SCC5; b) SCC6; c) SCC7

Mase uzoraka 7, 8 i 9 iz mješavine SCC7 koji su nakon zagrijavanja na 300°C, te naglog hlađenja vodom ponovno podvrgnuti procesu sušenja, usporedit će se s rezultatima dobivenim u fazi nakon prvog procesa sušenja.

Na slici 6.28. vidljivo je da se masa (nakon procesa zagrijavanja i ponovnog sušenja) dodatno umanjila za oko 1% u odnosu na masu nakon prvog procesa sušenja.



Slika 6.28. Usporedba mase uzoraka 7, 8 i 9- SCC7

#### 6.2.4 Promjena temperature

Kao što je u uvodu rečeno uzorcima 12, 18 i 24 mješavine SCC7 u svježem stanju postavljen je termopar pomoću kojeg se, u ovom radu, mjerila temperatura neposredno nakon izvlačenja uzoraka iz peći, kao i njena promjena tijekom procesa hlađenja vodom. Kod uzorka 12 nakon pečenja na 300°C izmjerena je unutrašnja temperatura od oko 230°C, dok je kod uzorka 15 nakon pečenja na 500°C laserom dobivena površinska temperatura od 450°C. Nakon zagrijavanja na 500°C, pomoću termopara, uzorku 18 izmjerena je unutrašnja temperatura od oko 420°C. Na slici 6.29. prikazana je vrijednost temperature mjerena na uzorku 24. Navedeni uzorak pečen je na temperaturi od 700°C, a prikazana temperatura je dobivena dok je uzorak još bio u peći.



*Slika 6.29. Temperatura unutar strukture uzorka 24 mješavine SCC7*

### 6.2.5 Struktura betona

Tijekom pečenja nije se javilo eksplozivno ljuštenje koje se zna pojaviti na temperaturama iznad  $100^{\circ}\text{C}$  kada voda u porama betona prelazi u vodenu paru i kad tlak vodene pare prekorači vrijednost koju struktura betona može podnijeti.

Međutim kod uzoraka 16, 17 i 18 mješavine SCC7 koji su neposredno nakon izlaganja temperaturi od  $500^{\circ}\text{C}$  izloženi prahu vatrogasnog aparata, vidljive su površinske reakcije. Reakcije na površini betona prikazane su na slici 6.30. Njihovo pojavljivanje posljedica je međusobnog kontakta praha i zagrijanog uzorka. Pojavu bi trebalo još dodatno ispitati.



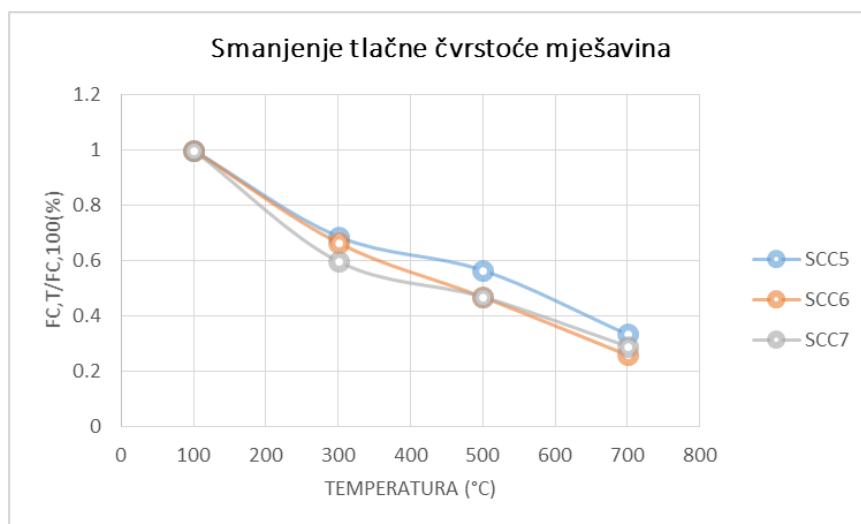
*Slika 6.30. Površinska reakcija uzoraka nakon izlaganja prahu vatrogasnog aparata*



### 6.2.6 Analiza dobivenih rezultata

U ovom poglavlju analiziraju se dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti i mase, prije i nakon procesa sušenja te nakon pečenja uzoraka te procesa naglog hlađenja za sve tri promatrane mješavine.

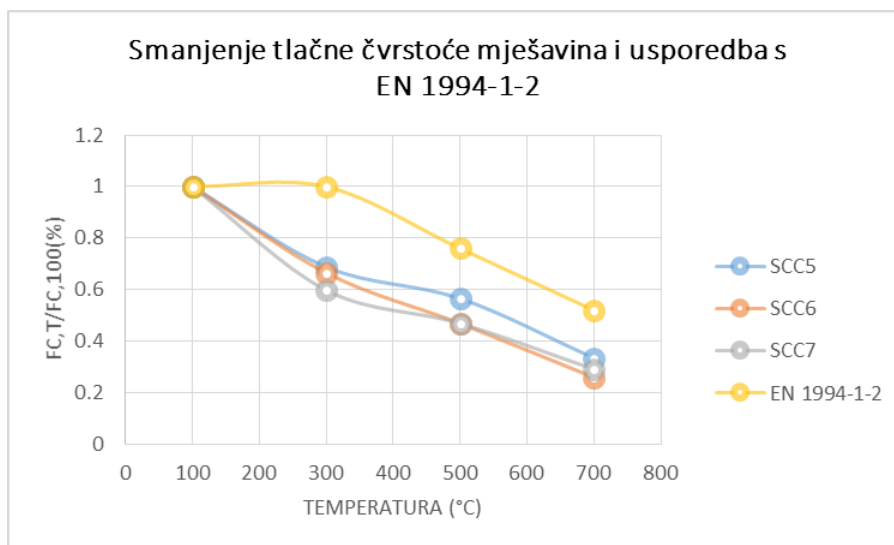
Na slici 6.31. prikazani su rezultati tlačne čvrstoće u bezdimenzionalnom obliku na način da se srednja vrijednost čvrstoća  $f_{c,T}$ , na temperaturi  $T$ , podijelila s početnom vrijednošću čvrstoće dobivenom ispitivanjem uzoraka nakon sušenja na  $100^{\circ}\text{C}$  i hlađenja vodom, oznake  $f_{c,100}$ . Sve tri navedene mješavine pokazuju trend opadanja uslijed povećanja temperature kojom se izlažu uzorci. Iz nagiba tangente na prikazane krivulje vidljivo je da je najveći pad u vrijednosti upravo u intervalu temperature od  $100^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$  za sve promatrane mješavine. Uzorci u tom intervalu gube i do 60 % svoje početne vrijednosti. Na temperaturi od  $300^{\circ}\text{C}$  najmanji pad vrijednosti tlačne čvrstoće ima mješavina SCC5, odmah iza nje nalazi se SCC6, dok SCC7 bilježi najveći pad u odnosu na početnu vrijednost. Na  $500^{\circ}\text{C}$  mješavine SCC6 i SCC7 imaju približno jednaku vrijednost od oko 47 %, dok SCC5 zadržava oko 57 % početne vrijednosti. Na temperaturi od  $700^{\circ}\text{C}$  najveći pad vrijednosti pokazuje mješavina SCC6. Nešto bolje ponašanje vidljivo je kod SCC7, dok uzorci mješavine SCC5 pokazuju najmanji pad u vrijednosti tlačne čvrstoće.



Slika 6.31. Smanjenje tlačne čvrstoće

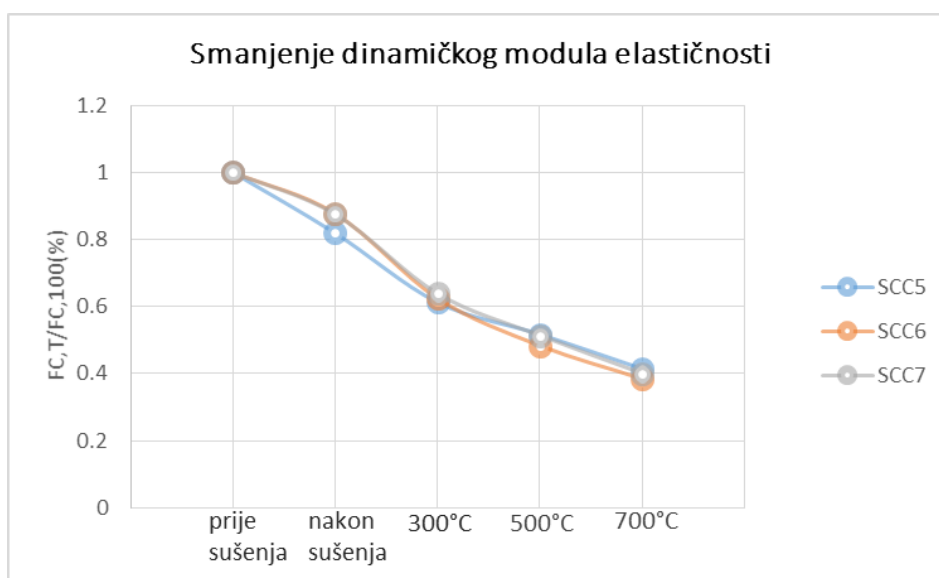
Na slici 6.32. prikazana je usporedba dobivenih rezultata u ovom radu sa vrijednostima iz eurokoda EN 1994-1-2 za laki beton. Dobiveni rezultati su znatno manji u odnosu na normom propisane vrijednosti iz razloga tog što su uzorci hlađeni vodom i time im je dodatno narušena vrijednost tlačne čvrstoće.





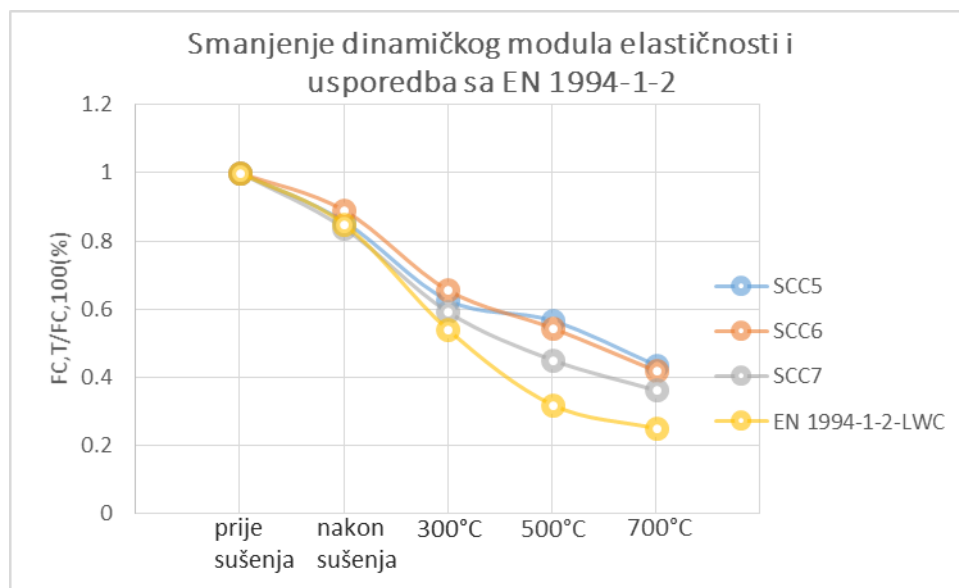
*Slika 6.32. Usporedba dobivenih rezultata s EN 1994-1-2*

Na slici 6.33. jasno je vidljivo smanjenje dinamičkog modula elastičnosti s povećanjem temperature gdje su vrijednosti dobivene osrednjavanjem rezultata na zadanoj temperaturi podijeljene s referentnom vrijednosti odnosno onom dobivenom prije procesa sušenja. S obzirom da su, kao što je i ranije navedeno, uzorci hlađeni vodom neposredno nakon vađenja istih iz električne peći, promjena mase uzoraka zbog hlađenja vodom utječe na dobivene rezultate. Može se samo konstatirati da mješavine SCC6 i SCC7 imaju približno jednako ponašanje (osim na temperaturi od 500°C), dok je iz nagiba grafa vidljivo da SCC5 ima najveći pad promatrane vrijednosti u intervalu temperature od vrijednosti dobivene prije sušenja do vrijednosti dobivene nakon pečenja na 300°C te naglog hlađenja vodom.



*Slika 6.33. Smanjenje dinamičkog modula elastičnosti*

Gore navedene dobivene vrijednosti u ovom radu usporedit će se s rezultatima za laki beton LWC predloženim u normama slika 6.34. prikazuje usporedbu navedenih vrijednosti. Iz navedenog može se zaključiti da su vrijednosti veće u odnosu na normom date vrijednosti, što je uzrokovano većom masom uzoraka zbog načina hlađenja.

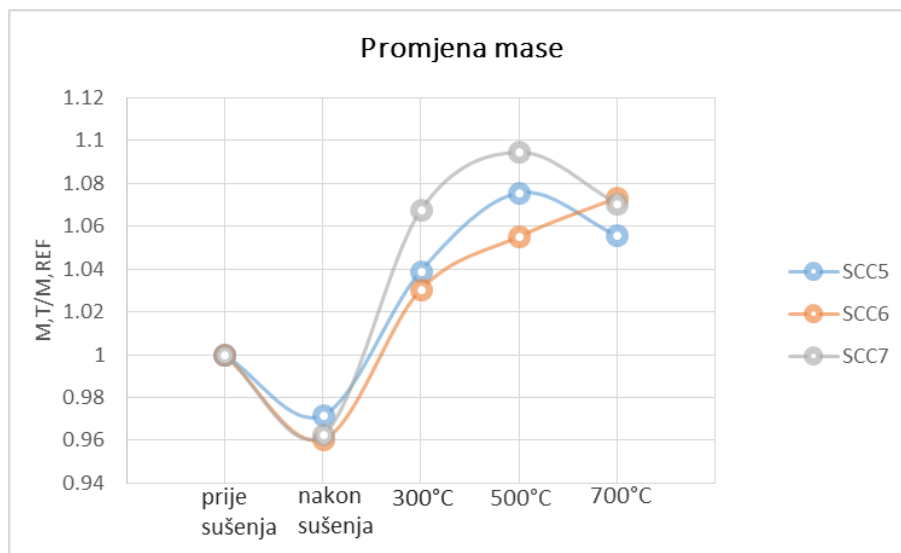


Slika 6.34. Usporedba dinamičkog modula elastičnosti s EN 1994-1-2

Na slici 6.35. prikazan je graf promjene mase uzoraka ispitivanih u ovom radu. Vidljivo je ponašanje sve tri mješavine, u svim fazama mjerenja. Prikazane vrijednosti dobivene su osrednjavanjem te dijeljenjem podataka na promatranoj temperaturi s srednjom referentnom vrijednosti.

Kao što je i bilo za očekivati, u uzorcima sve tri mješavine došlo je do isparavanja određene količine slobodne vode tijekom procesa sušenja 24 sata na 100°C i samim time do pada mase mjerene nakon procesa sušenja. Suprotno tome, uzorci pečeni na 300°C, 500°C i 700°C koji su izloženi procesu naglog hlađenja vodom neposredno nakon vađenja istih iz peći, pokazuju povećanje mase. Zaključak je da uzorci tijekom procesa pečenja gube na masi, točnije dolazi do isparavanja slobodne vode na nižim temperaturama te kemijski vezane vode na višim. Uslijed hlađenja vodom dolazi do upijanja unutar strukture betona određene količine vode, te kao rezultat toga dolazi do povećanja mase u odnosu na referentnu vrijednost. Iz grafa je vidljivo da uzorci mješavina SCC5 i SCC7 najveću vrijednost mase pokazuju nakon hlađenja uzoraka na 500°C, iz čega se zaključuje da uzorci s dodatkom recikliranog betona i metakaolina na temperaturi od 700°C znatno gube na masi, odnosno iako su najduže izloženi vodi, količina vode koju je uzorak apsorbirao manja je od one koju je izgubio tijekom procesa pečenja na

700°C. Isto tako i zbog visokih temperatura samih uzoraka, voda koja dođe u kontakt sa uzorkom odmah isparava, te se oko njega stvara i oblak vodene pare. Uzorci SCC6 s dodatkom filera od silikatne prašine pokazuju jednolik rast s obzirom na temperature zagrijavanja. Tako promatrana mješavina pokazuje najveću masu upravo nakon pečenja na 700°C te procesa naglog hlađenja.



Slika 6.35. Promjena mase

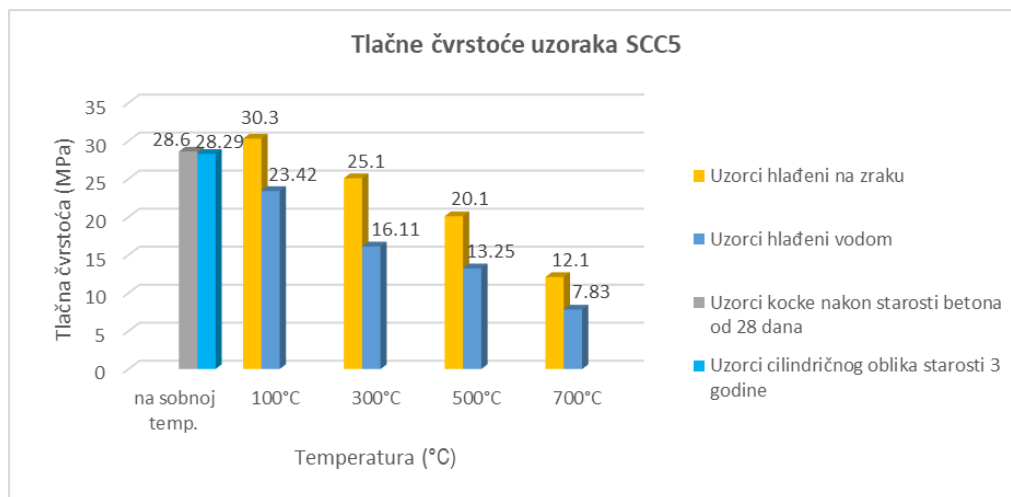
### 6.3 Usporedba dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim u diplomskom radu [5] u kojem su uzorci hlađeni na zraku

U ovom poglavlju usporedit će se rezultati tlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti kao i promjene mase uzoraka naglo hlađenih vodom s rezultatima uzoraka hlađenih na zraku preuzetih iz diplomskog rada [5]. U oba postupka hlađenja cilj je ohladiti uzorke do postizanja maksimalne temperature uzorka do 40°C. Uzorci su cilindričnog oblika promjera baze 75 mm i visine 225 mm. Treba naglasiti da su uzorci korišteni u ovom radu starosti 3 godine, dok su oni čiji su rezultati preuzeti iz diplomskog rada [5] ispitivani pri starosti od 2 godine.

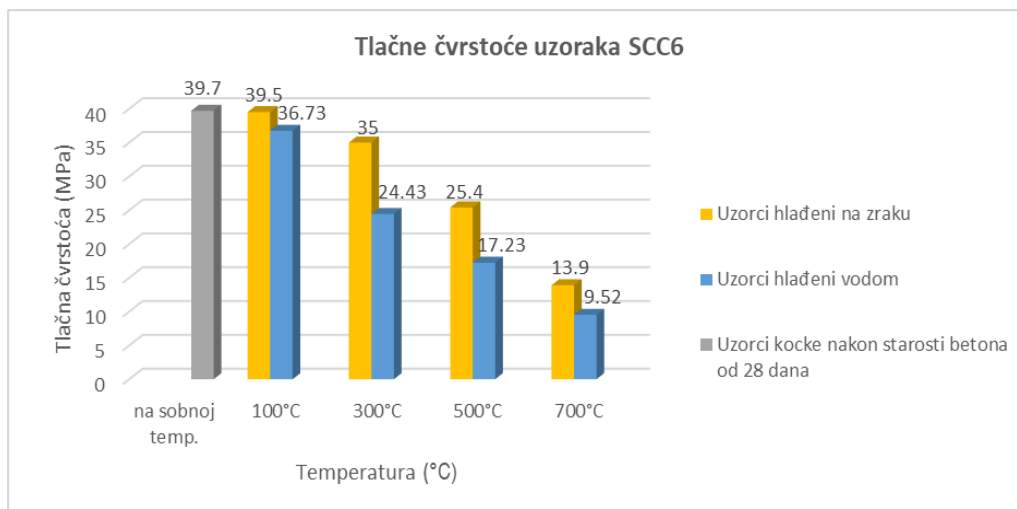
#### 6.3.1 Usporedba tlačne čvrstoće

Vrijednosti tlačne čvrstoće nakon naglog procesa hlađenja uzoraka vodom (dalje u radu uzorci (1)) dobivene u ovom radu usporedit će se s rezultatima preuzetim iz diplomskog rada [5] dobiveni nakon postepenog hlađenja uzoraka na zraku (dalje u radu uzorci (2)). Usporedba rezultata prikazana je na slici 6.36. a), b) i c). Na navedenim slikama vrijednost tlačne čvrstoće nakon 28 dana uzoraka hlađenih na zraku dobivena je ispitivanjem uzoraka oblika kocke, te je na slici prikazana drugom bojom.

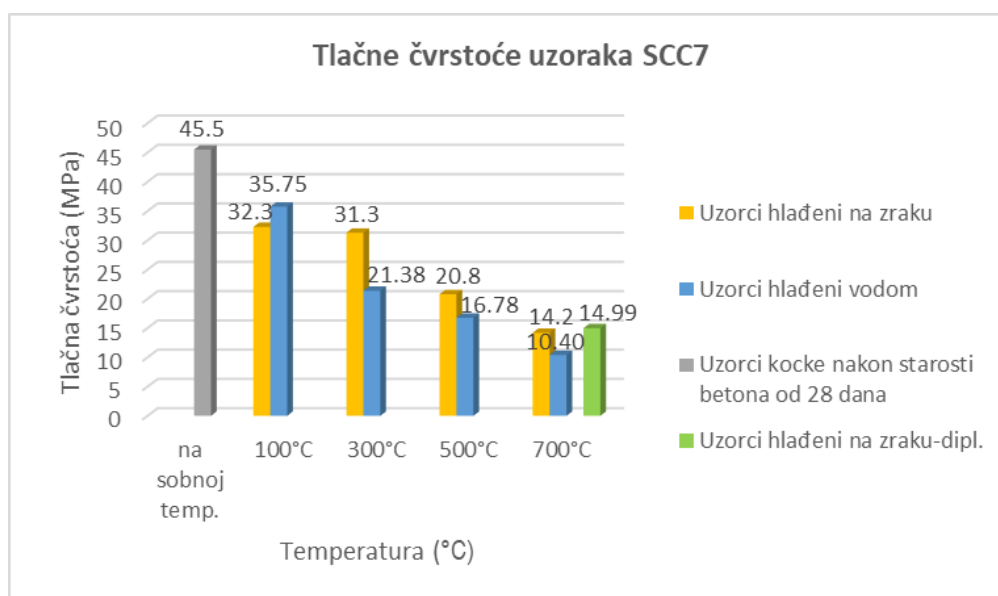
a)



b)



c)



Slika 6.36. Usporedba rezultata tlačne čvrstoće uzoraka hladjenih vodom s rezultatima uzoraka hladjeni prirodnim putem na zraku; a) SCC5; b) SCC6; c) SCC7

Iz prikazanih dijagrama, kod sve tri mješavine, vidljive su manje vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka naglo hladjenih vodom u odnosu na iste sastave uzoraka, ali hladjeni postepeno na zraku. Uočeno je kako način hlađenja znatno utječe na zadržavanje vrijednosti tlačne čvrstoće betona, što je u skladu s dosadašnjim ispitivanjima provedenim u svijetu od kojih su neki ranije prikazani u ovom radu.

U mješavini SCC5 s filerom od recikliranog betona vidljivo je da je vrijednost tlačne čvrstoće pri ispitivanju cilindričnih uzoraka starih 3 godine na sobnoj temperaturi neznatno

manja u odnosu na rezultate dobivene na uzorcima oblika kocke starim 28 dana, koji su preuzeti iz diplomskog rada [17]. Nakon sušenja uzoraka na 100°C uočava se da uzorci (1) zadržavaju 77 % vrijednosti čvrstoće uzoraka (2). Uzorci (1) koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C zadržali su 64 % vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka (2), dok su oni grijani na 500°C imali oko 66 % od vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene na uzorcima zagrijavanim na istoj temperaturi, ali hlađeni na zraku.

Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 700°C te naglo hlađeni vodom zadržali su 65 % vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih na zraku.

Vidljivo je da su uzorci, za oba načina hlađenja, nakon zagrijavanja na 700°C generalno znatno izgubili na tlačnoj čvrstoći. Uočava se da je pad tlačne čvrstoće, pri usporedbi uzoraka (1) s uzorcima (2), prilično ujednačen na svim temperaturama zagrijavanja i kreće se oko 65 %. Također, može se zaključiti da je najveća razlika u rezultatima dobivena nakon zagrijavanja uzoraka na temperaturi od 300°C.

U mješavini SCC6 s filerom od silikatne prašine nije dobivena vrijednost tlačne čvrstoće na sobnoj temperaturi cilindričnih uzoraka da bi se ista mogla usporediti sa tlačnom čvrstoćom nakon 28 dana. Nakon sušenja uzoraka na 100°C vidljivo je da uzorci (1) zadržavaju čak 92 % vrijednosti čvrstoće uzoraka (2). Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C te naglo hlađeni vodom zadržali su 70 % vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka (2), dok su oni zagrijavani na 500°C imali oko 68 % od vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene na uzorcima zagrijavanim na istoj temperaturi, ali hlađeni na zraku. Uzorci koji su pečeni na temperaturi od 700°C te naglo hlađeni vodom zadržali su 69 % vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih na zraku.

Uočava se da je pad tlačne čvrstoće uzoraka (1) u odnosu na uzorke (2) prilično ujednačen na svim temperaturama zagrijavanja, izuzev na 100°C, i kreće se oko 69 %. Također, može se zaključiti da je najveća razlika u rezultatima dobivena nakon zagrijavanja uzoraka na temperaturi od 300°C.

U mješavini SCC7 s filerom od metakaolina nije dobivena vrijednost tlačne čvrstoće cilindričnih uzoraka na sobnoj temperaturi da bi se ista mogla usporediti sa tlačnom čvrstoćom nakon 28 dana. Nakon sušenja uzoraka na 100°C uočeno je da su uzorci (1) pokazali veću vrijednost u tlačnoj čvrstoći u odnosu na uzorke (2). Takav rezultat nije u skladu sa dosadašnjim dobivenim rezultatima, odnosno donešenim zaključcima. Moguće objašnjenje bi bilo da je tijekom vremena došlo do porasta čvrstoće betona, što potvrđuju i rezultati na slici 6.37. Uzorci (1) koji su zagrijavani na temperaturi od 300°C zadržali su 68 % vrijednosti tlačne čvrstoće

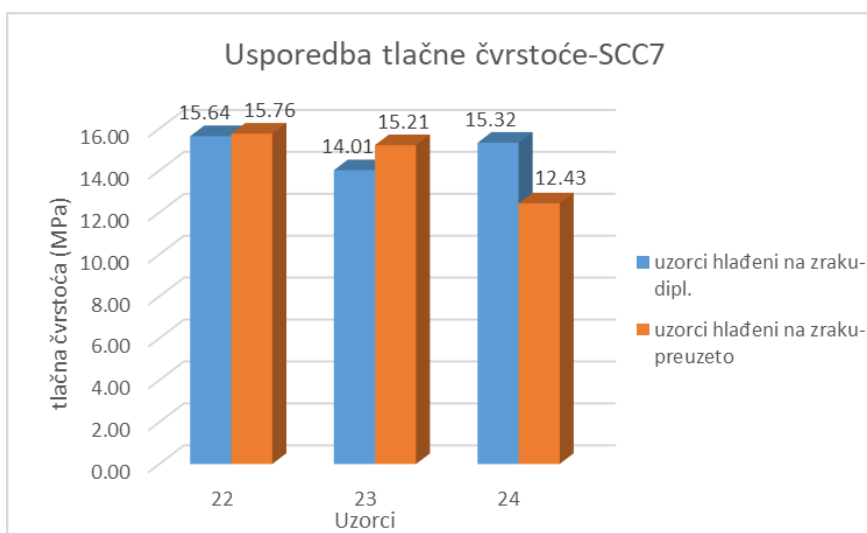
uzoraka (2), dok su oni grijani na 500°C imali oko 81 % od vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene na uzorcima zagrijavanim na istoj temperaturi, ali hlađeni na zraku.

Uzorci koji su zagrijavani na temperaturi od 700°C te naglo hlađeni vodom zadržali su 73 % vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih na zraku.

Vidljivo je da su uzorci SCC7 zadržali veću vrijednost tlačne čvrstoće nego li je to slučaj kod mješavina SCC5 i SCC6. Također uočava se da pad tlačne čvrstoće uzoraka (1) u odnosu na (2) nije ujednačen s povećanjem temperature. Najveća razlika u rezultatima dobivena je nakon zagrijavanja uzoraka na temperaturi od 300°C.

Za sve tri proučavane mješavine može se zaključiti da su uzorci nakon zagrijavanja na 700°C znatno izgubili na tlačnoj čvrstoći, bez obzira na proces hlađenja. Kao što je prije navedeno, rezultat toga je što beton na visokim temperaturama gubi svoja mehanička svojstva. Također vidljiv je nepovoljan utjecaj procesa hlađenja vodom na vrijednost tlačne čvrstoće.

Uzorci 22, 23 i 24 mješavine SCC7 nakon procesa pečenja na 700°C hlađeni su postepeno na zraku, na isti način kao što se provodilo u diplomskom radu [5]. Namjera je usporediti dobivene rezultate kako bi se uočila promjena u vrijednosti tlačne čvrstoće s obzirom da su u ovom radu uzorci stariji godinu dana. S obzirom na kvalitetu betona u svježem stanju i način ugradnje uzoraka, moguće je da nehomogenost betona uzrokuje dobivene razlike, kako je vidljivo i na primjeru slike 6.37. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih postepeno na zraku u ovom radu su nešto više od 2 % veće od vrijednosti dobivene u diplomskom radu [5]. Kako je prije rečeno, vjerojatno je došlo do prirasta čvrstoće tijekom protekle godine dana.

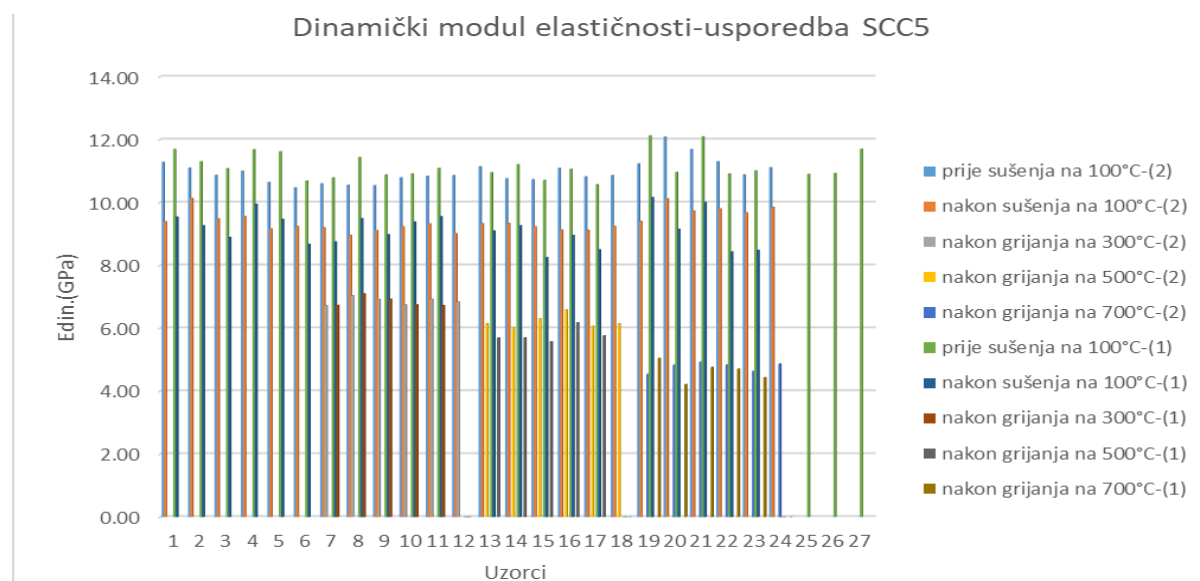


Slika 6.37. Usporedba tlačne čvrstoće

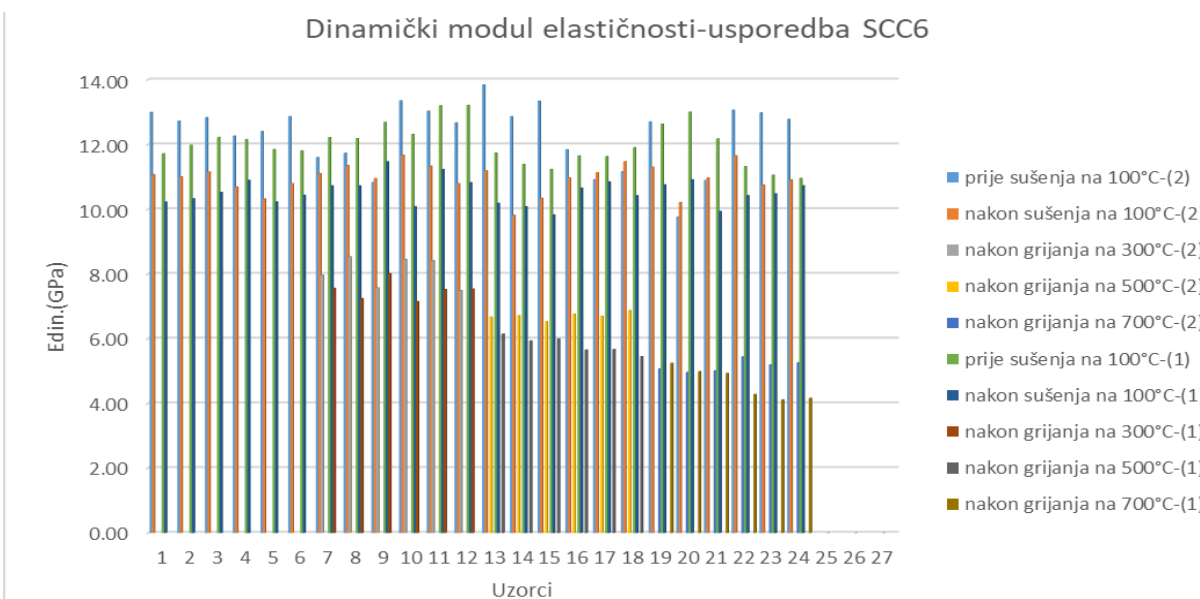
### 6.3.2 Usporedba dinamičkog modula elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti određuje se prema prethodno navedenom načinu bez obzira na odabrani proces hlađenja. Na slici 6.38. a), b) i c) prikazana je usporedba rezultata dobivenih u ovom radu, odnosno onih hlađenih vodom (1), s vrijednostima dobivenim nad uzorcima hlađenim na zraku (2), čiji su rezultati preuzeti iz diplomskog rada [5].

a)

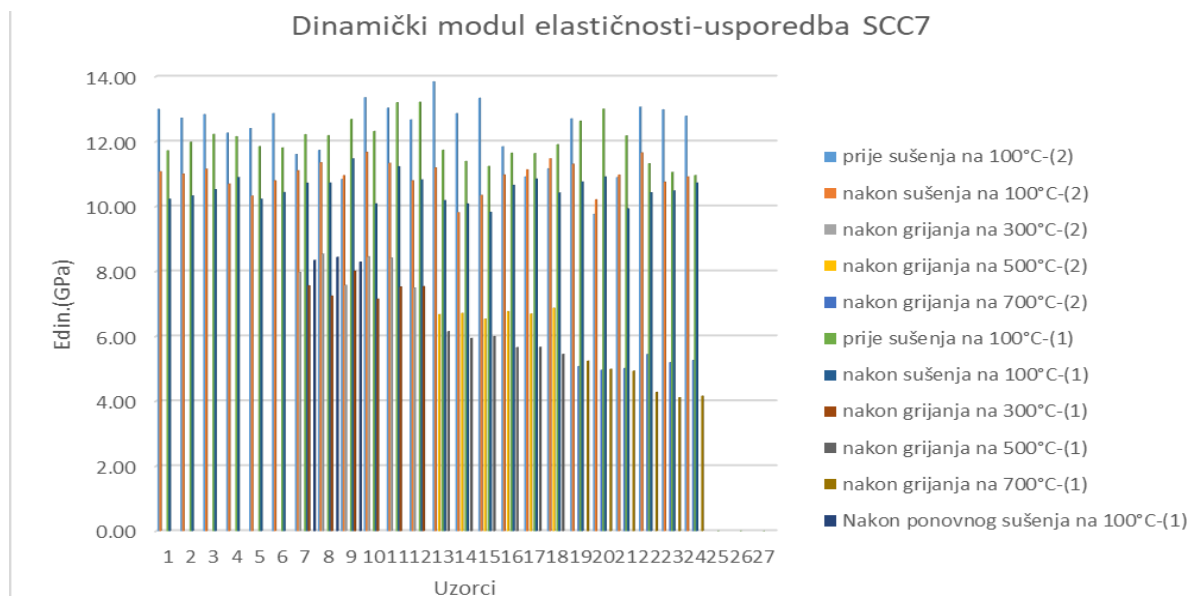


b)





c)



Slika 6.38. Usporedba dinamičkog modula elastičnosti uzoraka hlađenih vodom i na zraku;  
a) SCC5; b) SCC6; c) SCC7

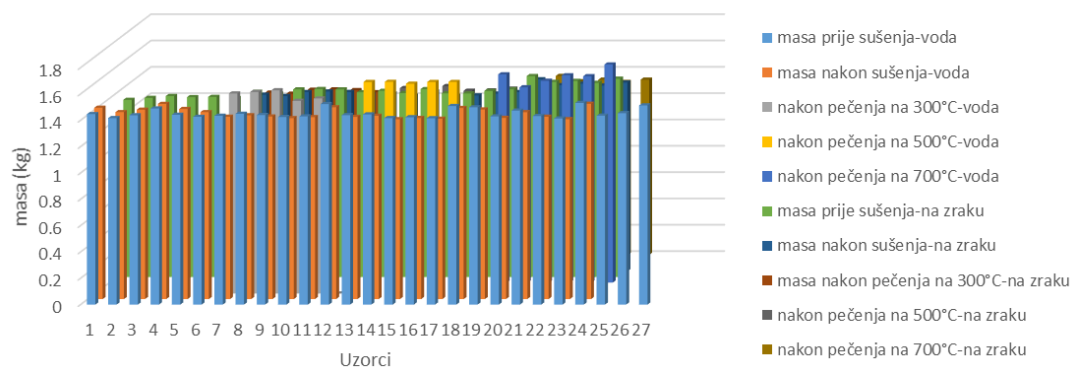
Na prikazanim slikama vidljivo je da se ne može donijeti jedinstven zaključak glede utjecaja vlažnosti na dinamički modul elastičnosti, što je i očekivano jer stanja uzoraka nisu ista.

### 6.3.3 Usporedba promjene masa uzoraka

Analizom rezultata promjene mase uzoraka betona na slici 6.39. a), b) i c) u globalu je uočeno povećanje mase naglo hlađenih uzoraka vodom u odnosu na masu dobivenu nakon hlađenja uzoraka na zraku. Navedeni rezultati samo su okvirni prikaz ponašanja mase, s obzirom da se ne radi o istim uzorcima, odnosno početna masa im nije jednaka. Uslijed hlađenja vodom, dio vode ispari u direktnom kontaktu s zagrijanim uzorkom, a dio se apsorbira unutar strukture uzorka. Zaključak je da uzorci koji su najdugotrajnije izloženi procesu hlađenja vodom bilježe najveću vrijednost apsorpcije vode, no to ne znači da isti uzorci bilježe i porast mase u odnosu na početnu vrijednost. Razlog tomu je što uzorci pri procesu sušenja, a pogotovo pečenja gube određenu količinu slobodne i kemijski vezane vode. Taj efekt izraženiji je kod uzoraka koji su zadržavani na temperaturi od 700°C jer pri toj temperaturi veliki postotak vode unutar strukture betona ispari.

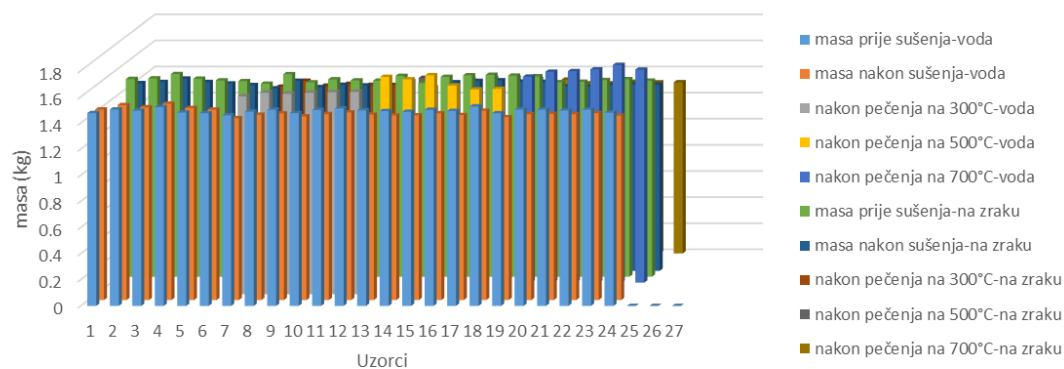
a)

Usporedba masa uzoraka naglo hlađenih vodom i hlađenih na zraku-SCC5



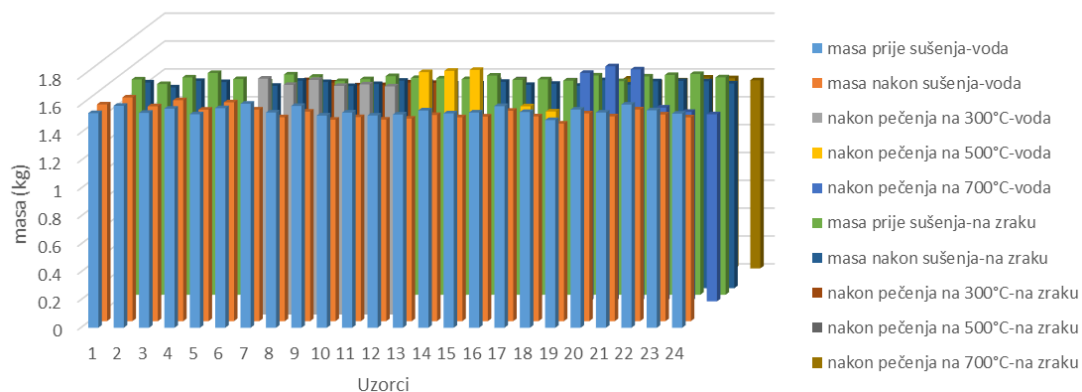
b)

Usporedba masa uzoraka naglo hlađenih vodom i hlađenih na zraku-SCC6



c)

Usporedba masa uzoraka naglo hlađenih vodom i hlađenih na zraku-SCC7

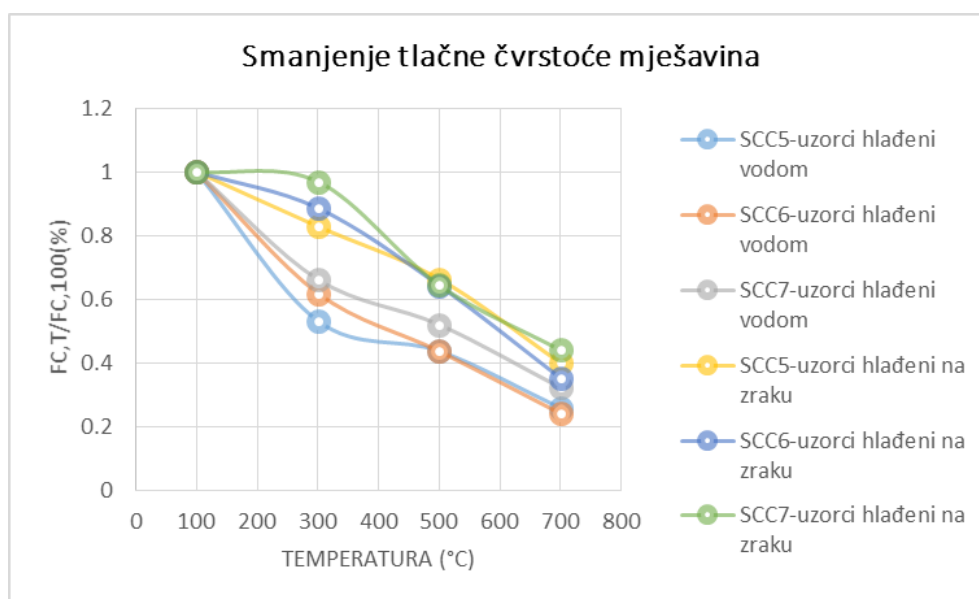


Slika 6.39. Usporedba promjene mase uzoraka; a) SCC5; b) SCC6; c) SCC7

### 6.3.4 Analiza rezultata

U ovom poglavlju analiziraju se vrijednosti tlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti i mase dobivene u ovom radu s rezultatima dobivenim u diplomskom radu [5] u kojem su uzorci hlađeni na zraku.

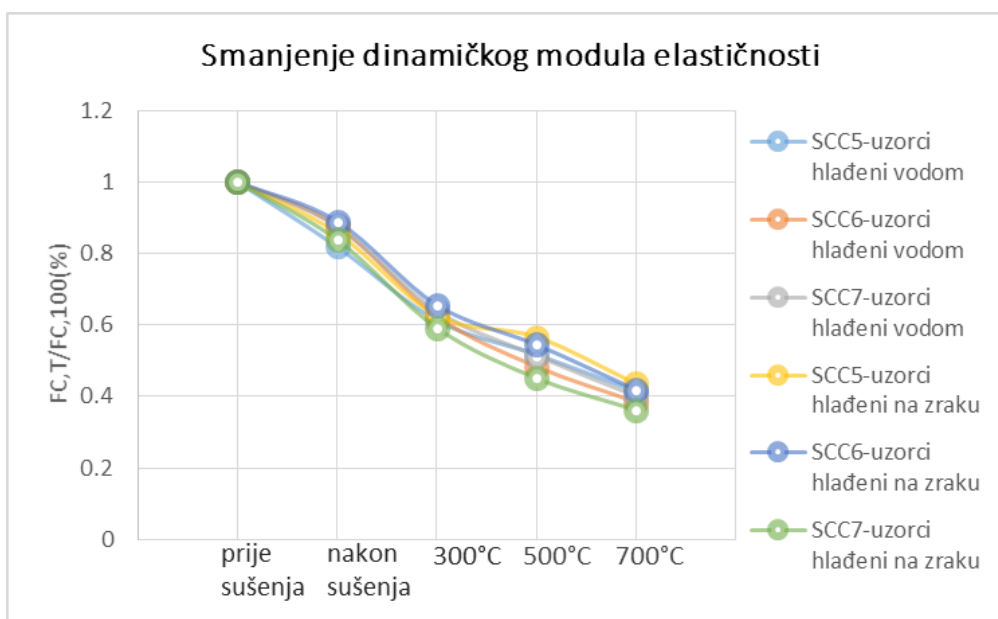
Na slici 6.40. prikazani su rezultati tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih vodom u bezdimenzionalnom obliku na način da se srednja vrijednost čvrstoća  $f_{c,T}$  na temperaturi  $T$  podijeli s početnom vrijednošću čvrstoće dobivene ispitivanjem uzoraka nakon sušenja na  $100^{\circ}\text{C}$  i hlađenja na zraku ( $f_{c,100}$ ), kao i rezultati tlačne čvrstoće uzoraka hlađenih na zraku u bezdimenzionalnom obliku preuzeti iz diplomskog rada [5]. Uzorci naglo hlađeni vodom pokazuju veći pad u tlačnoj čvrstoći u odnosu na uzorke hlađene na zraku. Najočitija razlika je na temperaturi od  $300^{\circ}\text{C}$  gdje uzorci hlađeni vodom imaju oko 65 %, dok oni hlađeni na zraku oko 90 % od početne vrijednosti. Na  $500^{\circ}\text{C}$  navedena razlika je manja, uzorci hlađeni vodom pokazuju oko 50 % od početne vrijednosti, dok oni hlađeni na zraku pokazuju nešto više od 60 %. Na  $700^{\circ}\text{C}$  uzorci hlađeni vodom pokazuju oko 30 % od početne vrijednosti, dok oni hlađeni na zraku pokazuju oko 40 %.



Slika 6.40. Usporedba smanjenja tlačne čvrstoće uzoraka

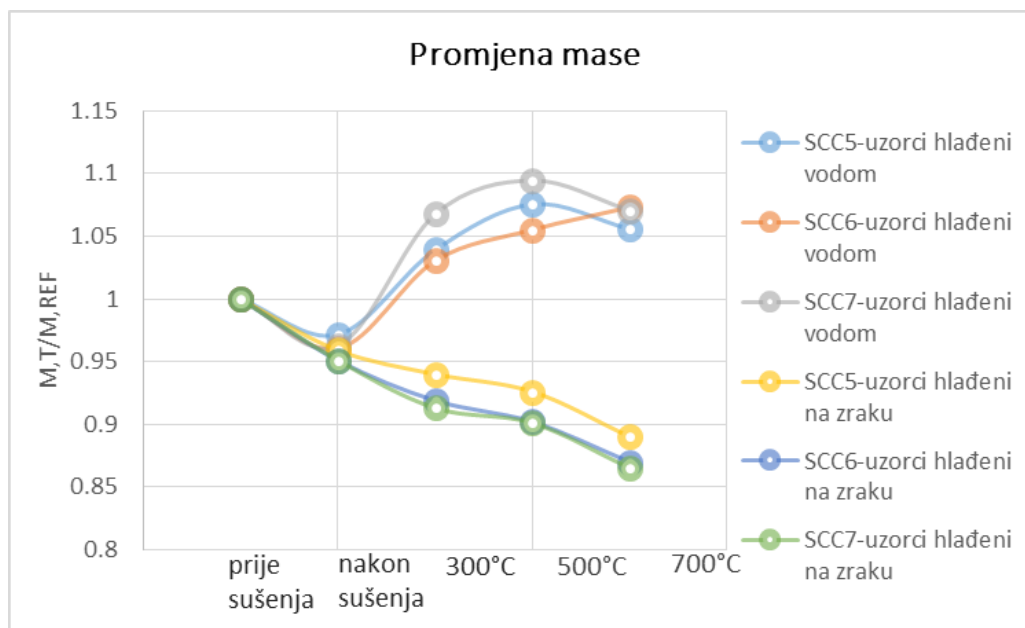
Na slici 6.41. prikazana je usporedba rezultata dinamičkog modula elastičnosti uzoraka naglo hlađenih vodom s rezultatima uzoraka hlađenih na zraku, preuzetih iz diplomskog rada [5]. Nakon zagrijavanja uzoraka na  $300^{\circ}\text{C}$  uočava se da su uzorci hlađeni vodom zadržali oko 60 % početne vrijednosti, dok su oni hlađeni na zraku zadržali vrijednost u intervalu od 60 do

65 %. Nakon zagrijavanja na 500°C, uprosječna vrijednost uzoraka hlađenih vodom, kao i onih hlađenih na zraku, je oko 50 % početne vrijednosti. Nakon zagrijavanja uzoraka na 700°C te hlađenja vodom, odnosno zrakom, uočava se da dinamički modul elastičnosti ima vrijednost od oko 40% početne vrijednosti, za oba načina hlađenja. Uzrok ovakvim rezultatima su teži uzorci nakon procesa hlađenja vodom, pa se dobije veći dinamički modul elastičnosti.



Slika 6.41. Usporedba smanjenja dinamičkog modula elastičnosti uzoraka

Na slici 6.42. prikazan je graf usporedbe promjene mase uzoraka ispitivanih u ovom radu s rezultatima dobivenim mjerenjem mase uzoraka hlađenih na zraku, preuzetim iz diplomskog rada [5]. Jasno se uočava razlika u navedenim grafovima, upravo iz tog razloga što uzorci hlađeni na zraku tijekom procesa sušenja i pečenja znatno gube na masi, odnosno imaju stalno opadajući trend mase. Takvo ponašanje je sve vidljivije s povećanjem temperature zagrijavanja jer pri većoj temperaturi u uzorcima se oslobađa osim slobodne i kemijski vezana voda. Kod uzoraka naglo hlađenih vodom, prema ranije objašnjenom, dolazi do upijanja vode unutar strukture uzoraka te samim time i do povećanja mase. Rastući trend grafova na slici 6.42. prikazaju navedenu tvrdnju.



Slika 6.42. Usporedba promjene mase uzoraka

## 7 ZAKLJUČAK

Najveći udio građevinskog materijala koji se danas upotrebljava u svijetu čini beton. Beton kao cjelina, u odnosu na druge materijale, ima najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama jer ne oslobađa toksične plinove, ima malu toplinsku provodljivost, te kao materijal spada u skupinu negorivih materijala. Međutim, uslijed djelovanja visokih temperatura dolazi do pada mehaničkih svojstava te oštećenja strukture betona. Navedeni negativni utjecaji, ukoliko su intenzivnog karaktera, mogu dovesti do značajnog pada mehaničkih svojstava betonskog elementa. Brzina, kao i stupanj oštećenja uvelike ovise o temperaturi, vremenu izloženosti, sastavu betona, sadržaju vlage te veličini elementa.

Kod ispitivanja armiranobetonskih uzoraka, uočeno je da beton ima prihvatljivo ponašanje do temperature od 300°C, ali ni preko te temperature ne dolazi do pojave loma u betonu, već uzrok sloma konstrukcije najčešće se događa uslijed gubitka nosivosti armature.

Cilj ovog rada je proučavanje ponašanja betona uslijed djelovanja visokih temperatura kao i ispitivanje mehaničkih svojstava naglo hlađenih uzoraka vodom, odnosno ispitivanje utjecaja hlađenja vodom neposredno nakon djelovanja visokih temperatura na uzorke cilindričnog oblika. Dobiveni rezultati služe, između ostalog, i za usporedbu sa rezultatima dobivenim nakon hlađenja uzoraka na zraku. U radu su korišteni uzorci tri mješavine s različitim dodatcima, starosti tri godine. Mješavina oznake SCC5 u svom sastavu sadrži reciklirani beton, SCC6 silikatnu prašinu, dok mješavina SCC7 u svom sastavu ima udio metakaolina.

Pri tipičnom požaru, temperature dosežu oko 500°C unutar 10 minuta, i 950°C za 1 sat pa beton mora imati dovoljnu otpornost kako bi podnio nagli porast temperature kao i najveću temperaturu kojoj je izložen. Brz porast temperature tijekom požara uzrokuje porast tlaka energije u porama betona i može uzrokovati eksplozivno ljuštenje betonske površine, što nije bio slučaj prilikom ispitivanja provedenim u ovom radu.

U ovom radu uzorci su sušeni na 100°C, te zagrijavani na 300°C, 500°C i 700°C. Uočava se da mješavina SCC7 koja u svom sastavu sadrži metakaolin ima značajan pad vrijednosti tlačne čvrstoće, u odnosu na referentnu vrijednost, nakon zagrijavanja na 700°C te hlađenja vodom. S tog aspekta, najpovoljniji je beton koji u svom sastavu ima udio recikliranog betona, jer on bilježi najmanji pad tlačne čvrstoće u odnosu na početnu vrijednost. Međutim, uzorci mješavine SCC7 pokazuju najveću vrijednost tlačne čvrstoće nakon zagrijavanja uzoraka na 700°C što ih prema tome čini povoljnim. Utjecaj vlažnosti nije značajno utjecao na rezultate dinamičkog

modula elastičnosti, te se uočava da najpovoljnije rezultate daje mješavina SCC5. U ovom radu proučavao se i utjecaj hlađenja vodom na promjenu mase, te je zaključeno da nakon zagrijavanja uzoraka dolazi do isparavanja zarobljene vode unutar strukture uzoraka, no masa se povećava uslijed hlađenja vodom. Logičan zaključak je da je masa veća s dužim vremenom izlaganja uzoraka vodom. Pritom je kod pojedinih uzoraka došlo do povećanje mase u odnosu na početnu vrijednost, a kod ostalih apsorbirana količina vode nije nadmašila vrijednost one koja je isparila.

Temeljem navedenih rezultata uočava se da je mješavina SCC5 s dodatkom recikliranog betona pokazala najmanji pad početnih vrijednosti nakon djelovanja visokih temperatura, te naglog procesa hlađenja. S druge strane, ista mješavina na sobnoj temperaturi pokazuje najmanju vrijednost u tlačnoj čvrstoći, a samim time i nakon procesa zagrijavanja i hlađenja, za sve proučavane temperature.

U ovom radu uspoređivao se i utjecaj naglog hlađenja s rezultatima dobivenim nakon hlađenja uzoraka postepeno na zraku. Zaključak je da utjecaj vode ima negativan utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće koja je najčešće promatrani parametar betona. Također u ovom radu proučavan je utjecaj izlaganja uzoraka prahu vatrogasnog aparata, te potom hlađenja na zraku. Cilj navedenog ispitivanja je određivanje svojstava betona u realnim uvjetima gašenja požara. Uočeno je da takvi uzorci pokazuju i do 40 % veću vrijednost tlačne čvrstoće u odnosu na one hlađene vodom.

Može se zaključiti da se požarna otpornost betona uvelike razlikuje o načinu hlađenja. Na temelju ispitivanja provedenih u ovom radu zaključuje se da je najnepovoljniji način hlađenja vodom. S aspekta očuvanja mehaničkih svojstava, prvenstveno tlačne čvrstoće, povoljnije je na zagrijane uzorke djelovati prahom vatrogasnog aparata, što je uz djelovanje vodom, najučestaliji način sprječavanja širenja požara.

## 8 LITERATURA:

- [1] Ana Dežić: *Primjena prskanih betona za ojačanje konstrukcija*, Diplomski rad, Osijek, 2015.
- [2] <http://korak.com.hr/korak-043-rujan-2013-gradevinski-otpad-mogucnosti-recikliranja-nova-gospodarska-djelatnost/>
- [3] I. Kesegić, D. Bjegović, I. Netinger; Pregledni rad: *Upotreba reciklirane opeke kao agregata za beton*, 2008.
- [4] Željka Strinić: *Samozbijajući beton s opekarskim lomom*, Osijek, 2016.
- [5] Marina Pavlić: *Mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona nakon izlaganja visokim temperaturama*, Diplomski rad, 2016.
- [6] Nina Pletikosić: *Metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona prema Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai-u*, Završni rad, 2015.
- [7] Lidija Karla Vranješ: *Samozbijajući lagani beton s dodatkom punila od mljevene opeke*, Split, Diplomski rad, 2015.
- [8] [https://en.wikiarquitectura.com/wp-content/uploads/2017/01/Puente\\_Akashi\\_24.jpg](https://en.wikiarquitectura.com/wp-content/uploads/2017/01/Puente_Akashi_24.jpg)
- [9] [https://static.dezeen.com/uploads/2011/08/dezeen\\_London-Aquatics-Centre-2012-by-Zaha-Hadid\\_1.jpg](https://static.dezeen.com/uploads/2011/08/dezeen_London-Aquatics-Centre-2012-by-Zaha-Hadid_1.jpg)
- [10] Ivan Radmilo: *Laki beton*, Split, Završni rad, 2014.
- [11] Krstulović P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [12] <http://elkomnet.com/liapor/Files/Liapor-HR%20-%20lagani%20beton%202009-07.pdf>
- [13] Ivana Milišćević: *Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom*; Doktorska dizertacija, Osijek, 2014.
- [14] Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy: *Lightweight self-compacting concrete of high temperatures*; GRAĐEVINAR 67 (2015) 4, 329-338, 2014.



- [15] Cristina Calmeiro dos Santos, João Paulo C. Rodrigues: *Residual mechanical properties of calcareous and granite aggregate concretes after fire*, ICE Publishing, 2014.
- [16] B.Toumi, M.Resheidat, Z.Guemmedi, H. Chabil: *Coupled effect of high temperature and heating time on the residual strength of normal and high-strength concretes*, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 3, No. 4, Algeria, 2009.
- [17] Katarina Grbeša: *Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrsllog SCLC-a*,  
Diplomski rad